



UNITED NATIONS EDUCATIONAL, SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY
INTERNATIONAL CENTRE FOR THEORETICAL PHYSICS
I.C.T.P., P.O. BOX 586, 34100 TRIESTE, ITALY, CABLE: CENTRATOM TRIESTE



H4.SMR/1011 - 36

**Fourth Workshop on Non-Linear Dynamics
and Earthquake Prediction**

6 - 24 October 1997

***Electric and Magnetic Signals in Volcanic
and Tectonically Active Areas***

J.-L. LE MOUËL

**Institut de Physique du Globe
Paris, FRANCE**

Signaux électriques et magnétiques

d'origine

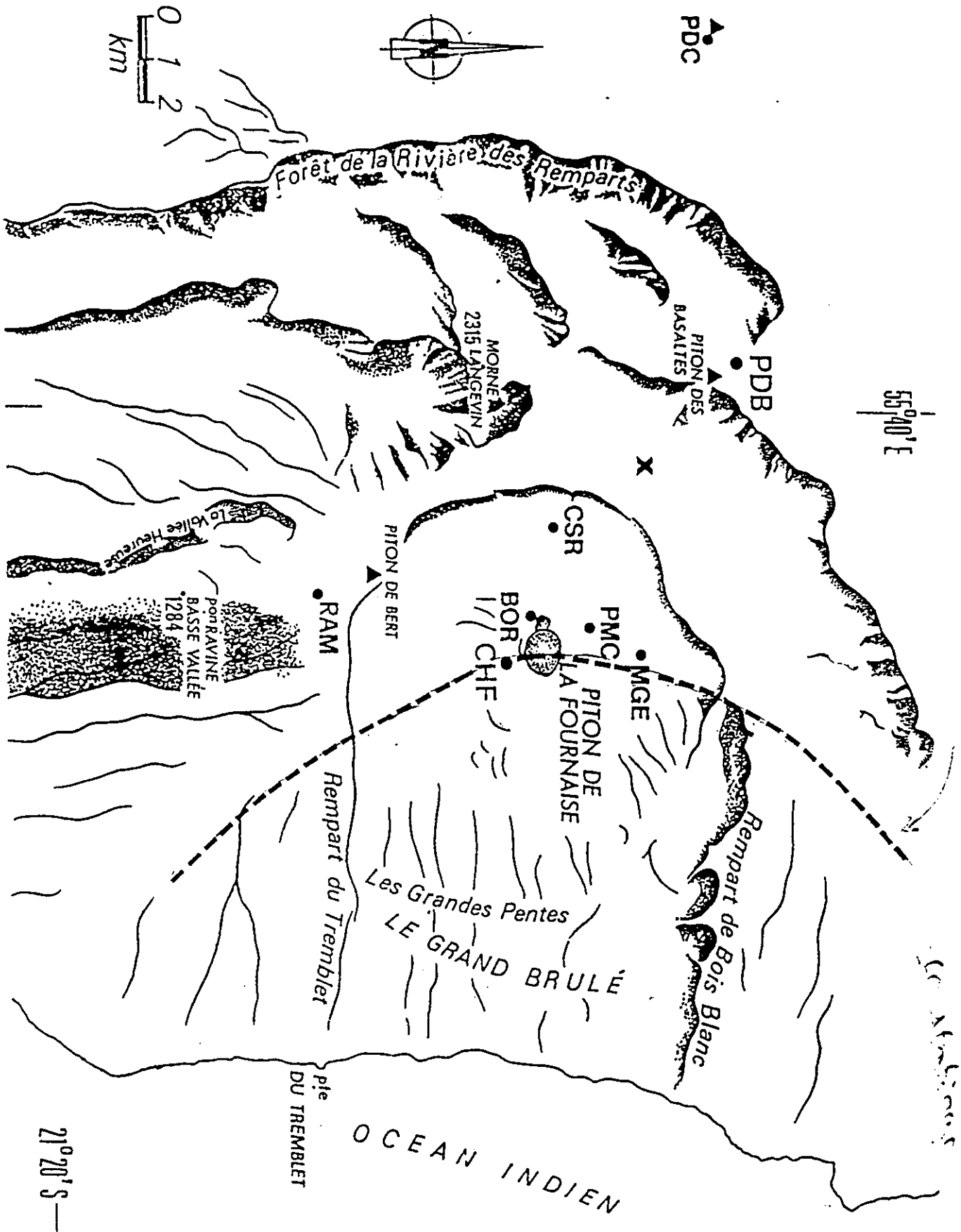
— volcanique

— sismotectonique.

- ① Le Piton de la Fournaise.
- ② Un modèle réduit sismo-tectonique
- ③ Analyse de deux SES (VAN)
- ④ Djibouti signal
- ⑤ China experiment
- ⑥ WLF
VLF.

Le Pitou de la Fournaise

Signaux magnétiques
et électriques



Piton de la Fournaise volcano. Caldera. Summit craters. Rift zone. MGE, PMC... are the magnetic stations where the intensity of the field is recorded

Definition of the quantities ΔB_{io}



x Observatoire

- On mesure $B(P_i)$
 $B(P_o)$ / $\vec{B}, |\vec{B}| = B$

Magnétométrie à protons
sensibilité 0,25 nT

- On calcule à l'observatoire
 $B(P_i) - B(P_o) = \Delta B_{io} = \Delta B(P_i, P_o)$
pour éliminer - en partie - les variations
magnétiques d'origine externe.

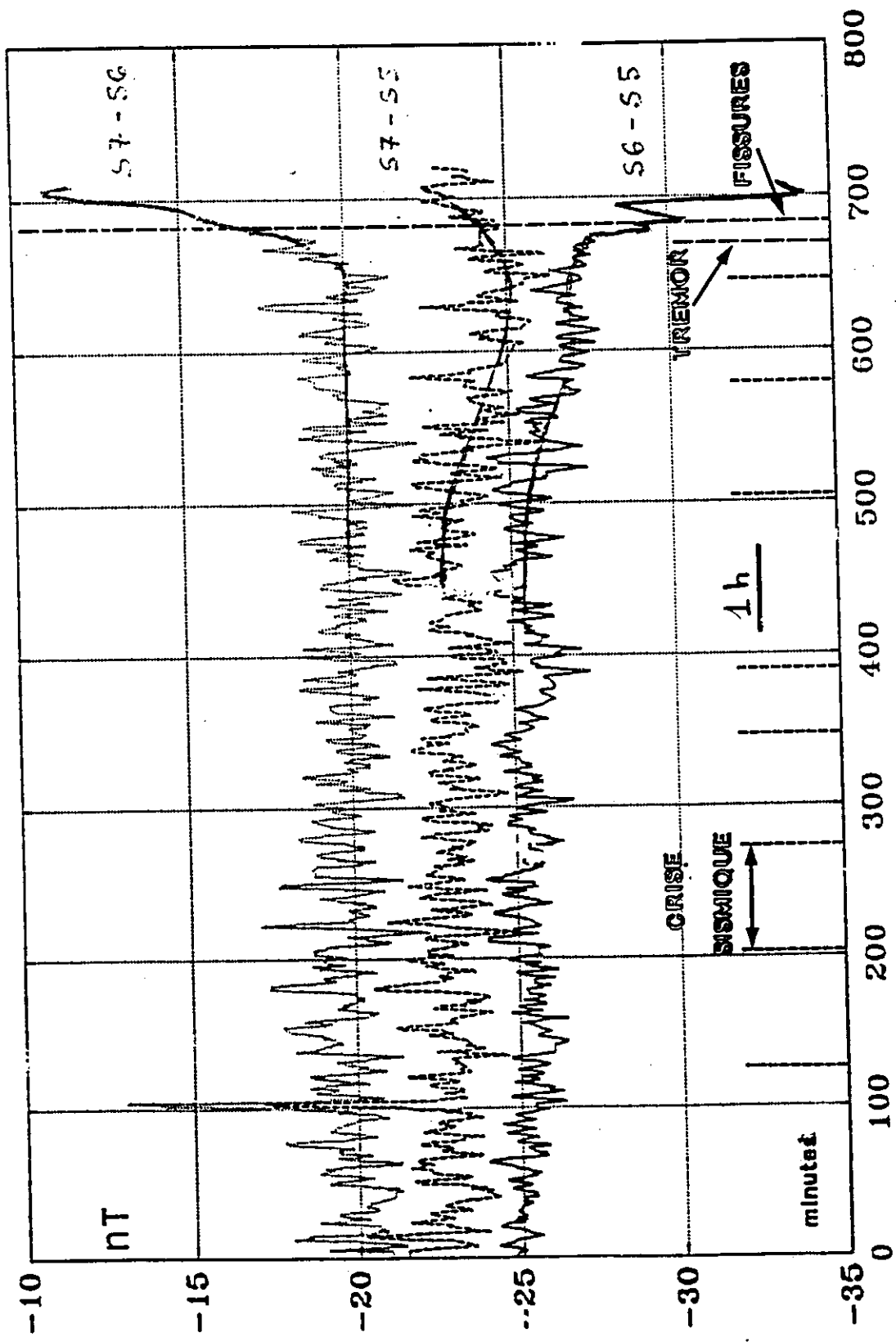
- On calcule les valeurs moyennes
 $\overline{\Delta B}$ / minute
x horaire
x hebdomadaire

Yours
Minute

5

6

18 JANVIER 1990



An example of variation of some differences ΔB_{10} a few hours before a tremor and the opening of fissures. Minute values.

Another example of variations ΔB_{io} (mean daily values) before November 6 1987 and November 30 1987 eruptions.

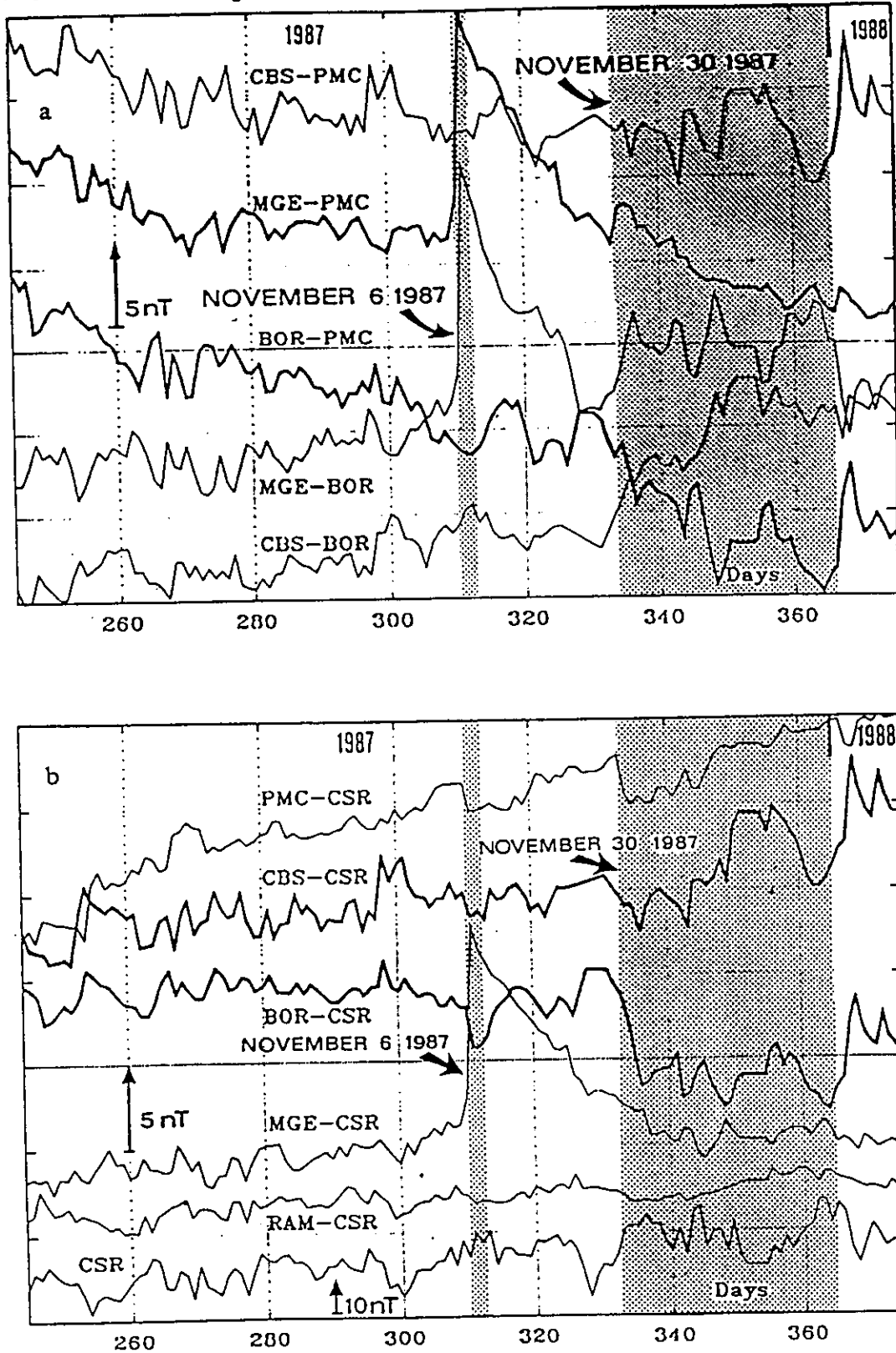
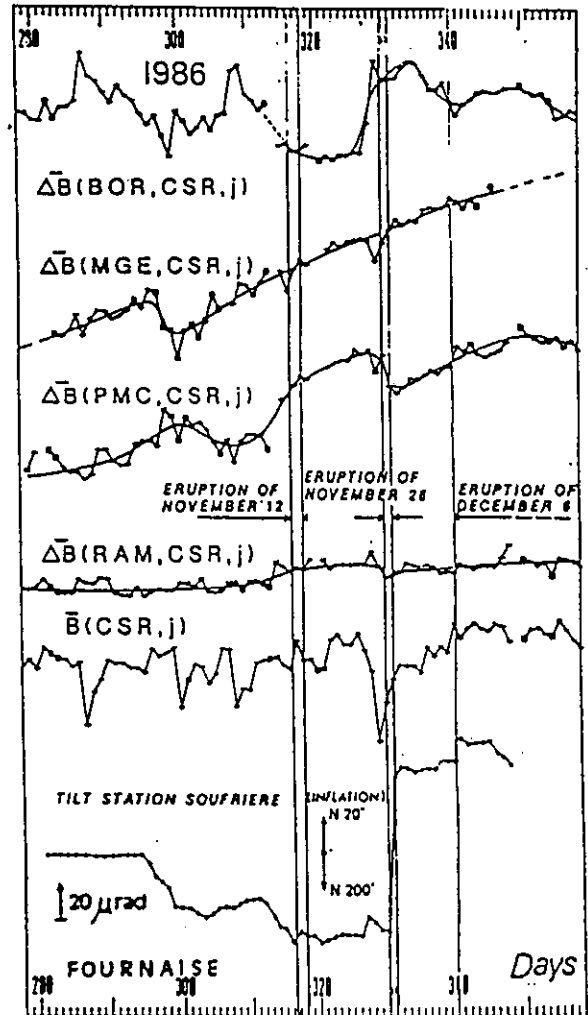
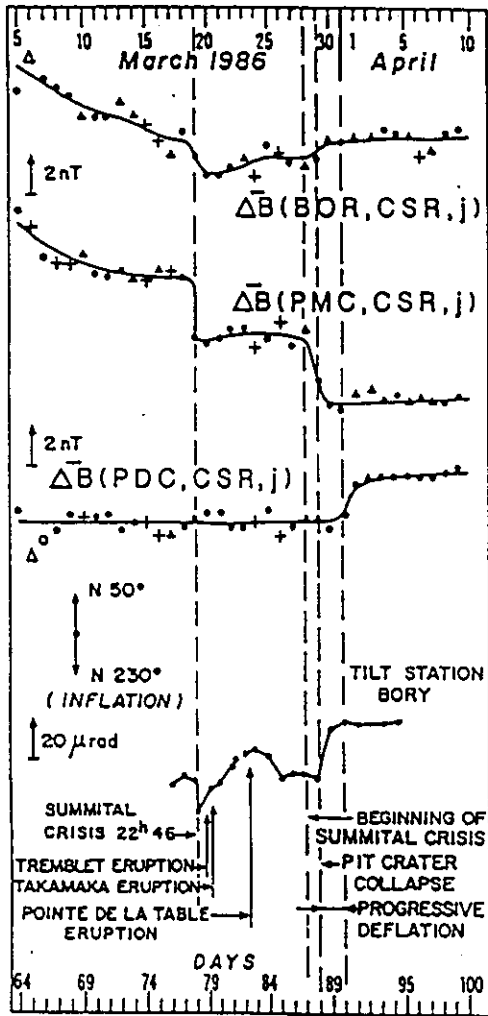


Fig. 2.2: Valeurs moyennes journalières du champ total à la station CSR et aux différences $(P_j - CSR)$ (a) et $(P_j - P_k)$ (b) entre le 2 septembre (jour 245) 1987 et le 10 janvier (jour 375) 1988. Les éruptions sont représentées en grisé.

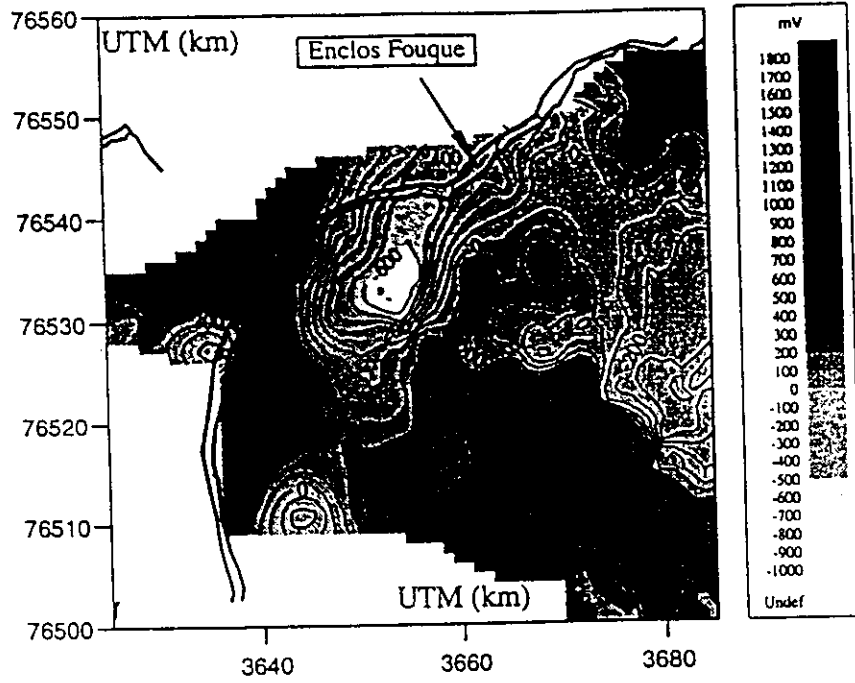
Mean daily values of ΔB_{io} between 1987 and 1988

Mean daily values

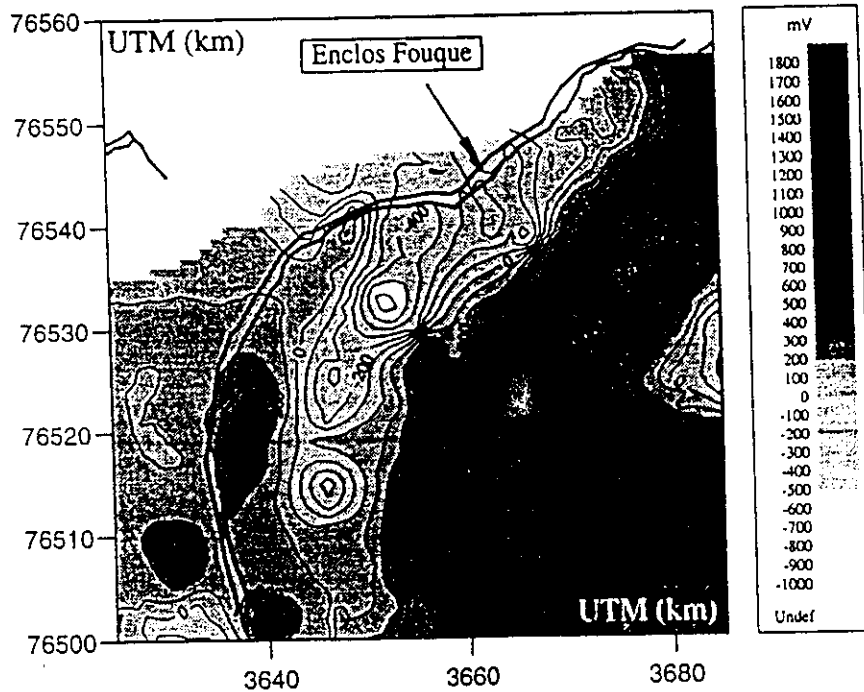


Another example

PS 1981



PS 1992



Contour maps of the spontaneous potential in the Northern part of the caldera (in volts) Top : 1981. Bottom : 1992. The map is changing with the activity of the volcano

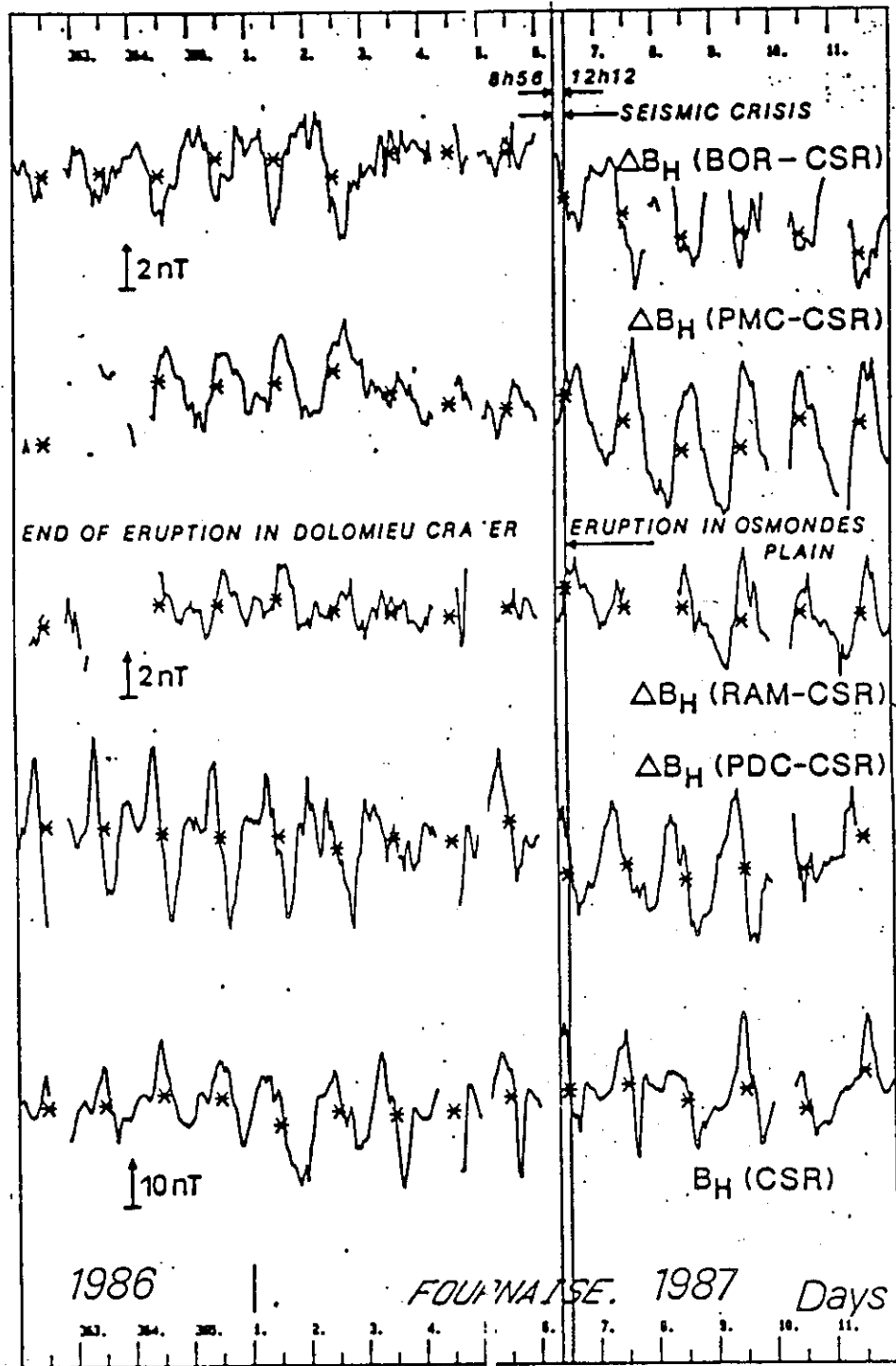


Fig. 11. Mean hourly values of the magnetic field at CSR and of the differences $\Delta B(P_i, CSR, t)$ between December 28, 1986, and January 11, 1987.

Differences in ΔB_{i0} hourly means. The daily variation (of ionospheric origin) tends to disappear a few days before the seismic crisis.

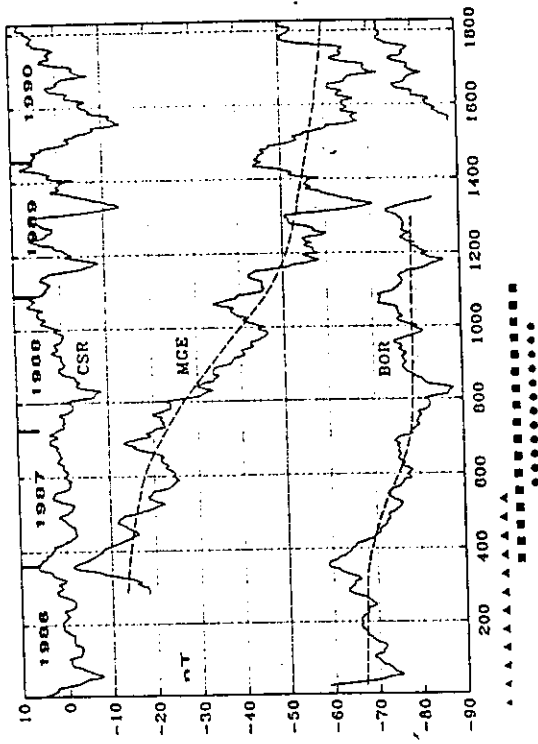


Fig. 3

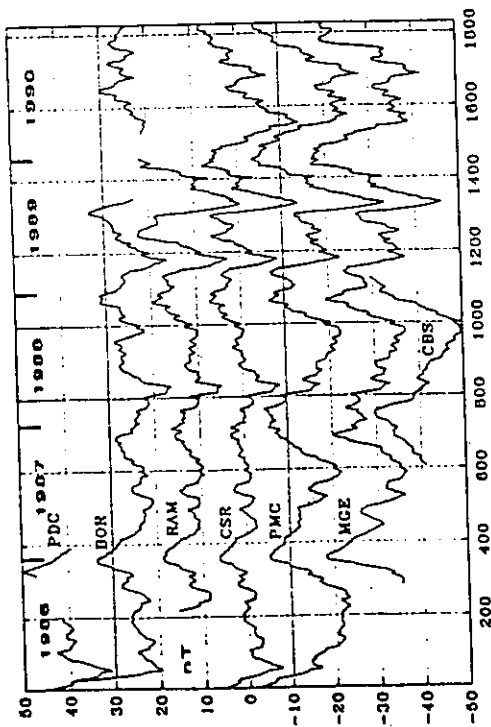


Fig. 4

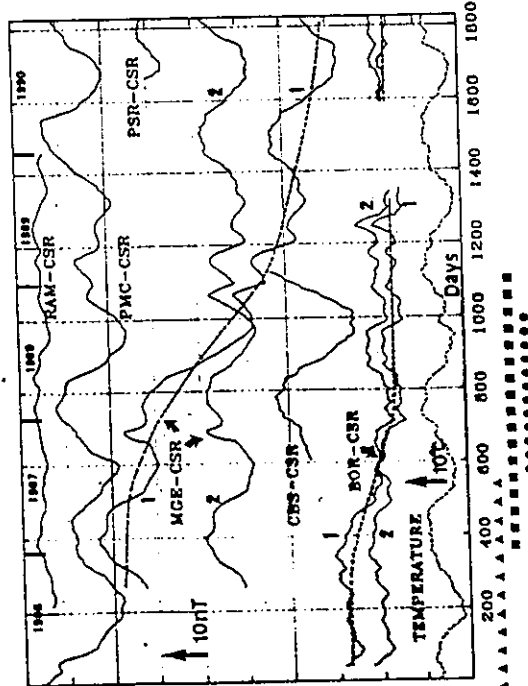


Fig. 5

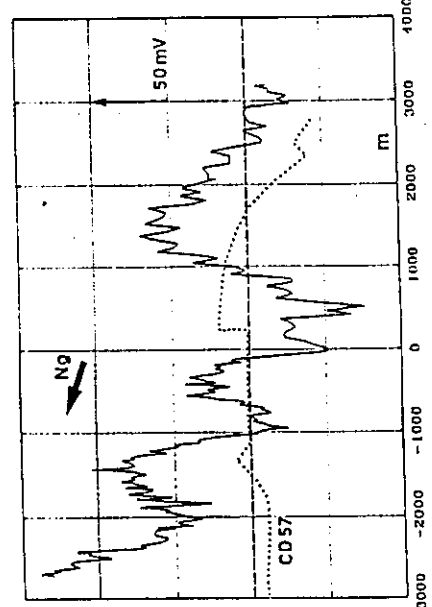


Fig. 6

Top right, daily means of the magnetic field at the different stations during the 1986-1990 time span.
 Top left, The same (with more stations) after removing a trend. Bottom left : differences. One sees an annual variation and a long term drift (especially MGE-CSR)

Interpretation.

all signals of electrokinetic origin.

A flow of water is perturbed by

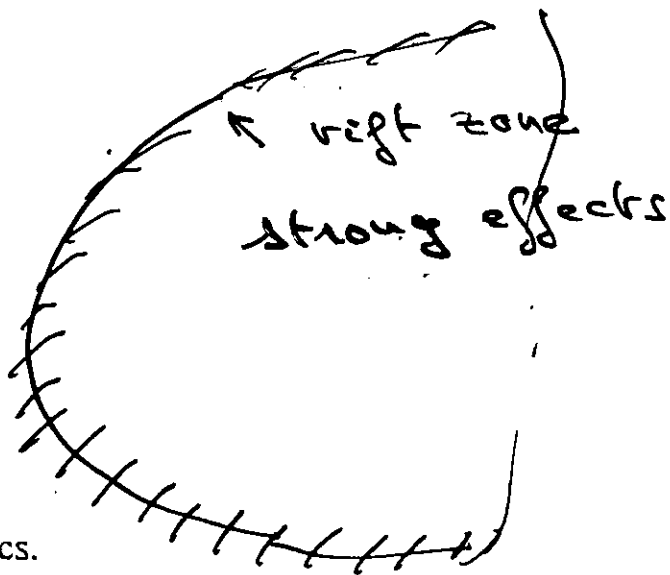
- stress - variations in the volcano
- external forcing (annual)
- general evolution of the volcano (long term)

$$\vec{H} = -\sigma \nabla^2 (\phi + CP)$$

Coulombian potential

pressure (M.H)

C = coupling coefficient



Some equations of electrokinetics.

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \nabla \times \iiint_V \frac{\vec{J}}{r} dV$$

B.S

Phénomènes électrocinétiques.

$$\begin{cases} \vec{J} = \rho \vec{q} = -\kappa \vec{\nabla} P - L_{12} \vec{\nabla} \Phi & (1) \\ \vec{I} = -L_{21} \vec{\nabla} P - \sigma \vec{\nabla} \Phi & (2) \end{cases}$$

$$L_{12} = L_{21} \quad (\text{Onsager}) \quad P = \mu - P_0 z$$

κ perméabilité (en sec.)

σ conductivité électrique

$(\Omega m)^{-1}$

$$C = \frac{L_{12}}{\sigma}$$

coefficient de courant
couplage

$(V P_0^{-1})$

$$C = \frac{E S}{\sigma \sigma_p}$$

\vec{J} : courant primaire.

$$(2) \rightarrow \vec{I} = -\sigma \vec{\nabla} \left(\Phi + \frac{L_{12}}{\sigma} P \right) = -\sigma \vec{\nabla} \psi$$

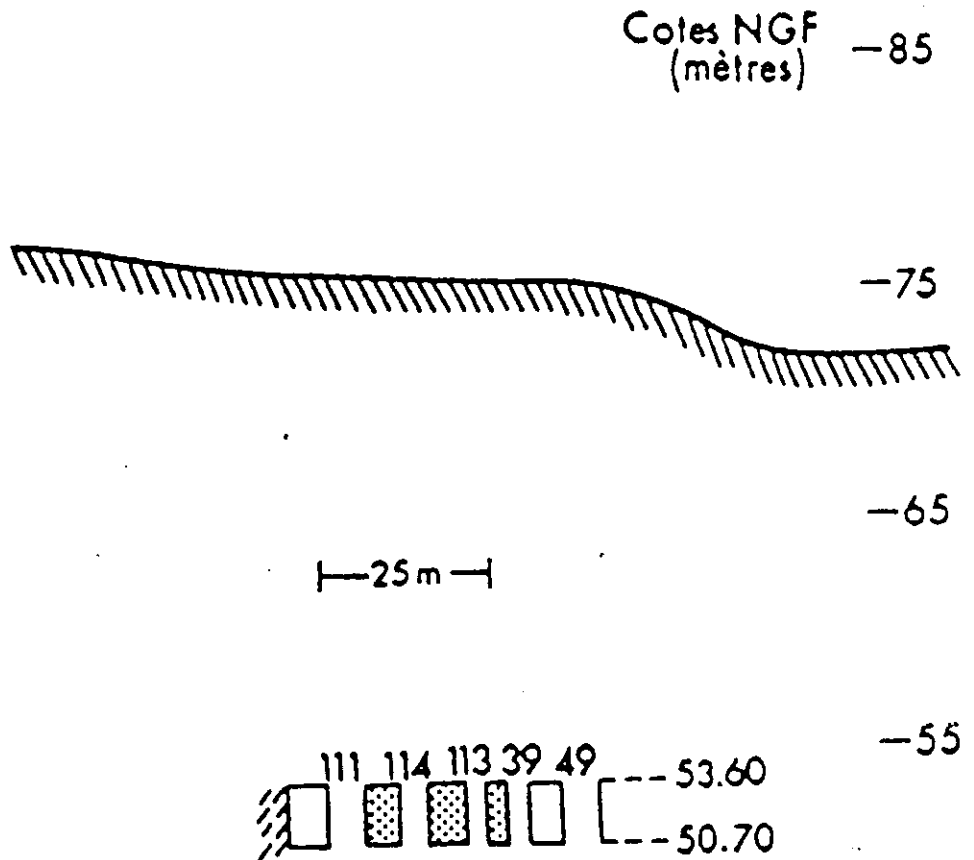
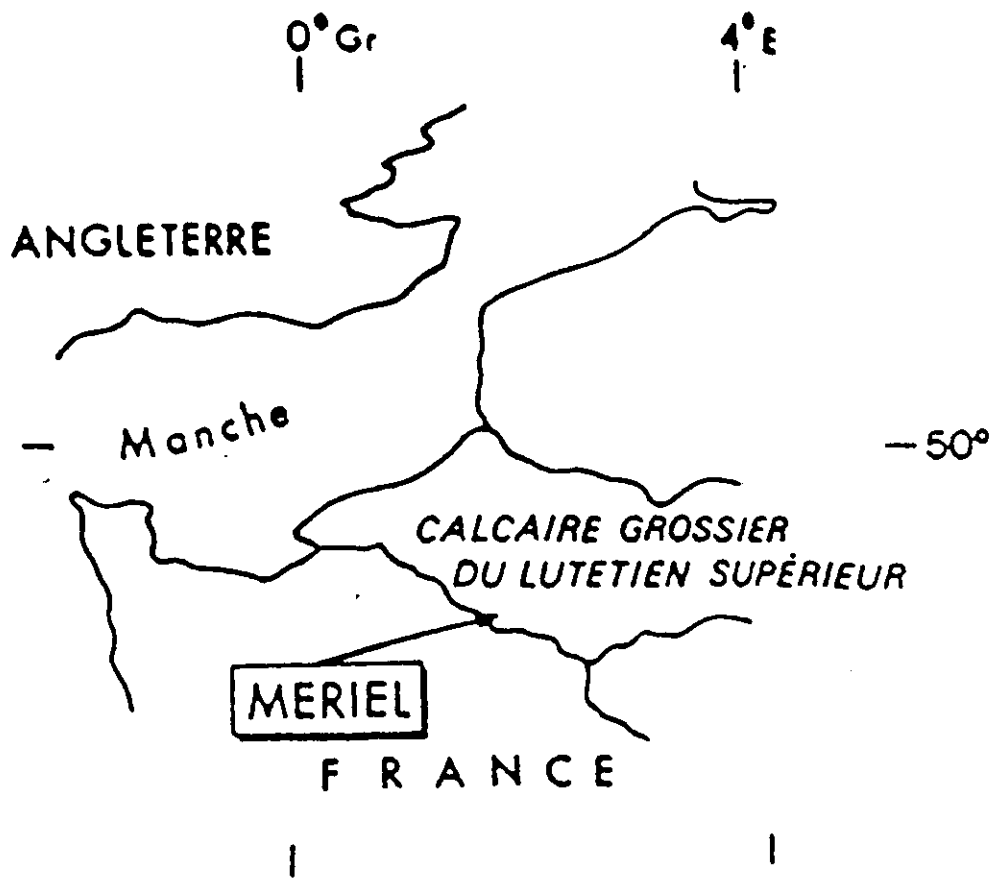
ψ : potentiel électrique total.

$$\text{div } \vec{I} = 0 \quad \rightarrow \quad \nabla^2 \psi = 0$$

Some equations of electrokinetics.

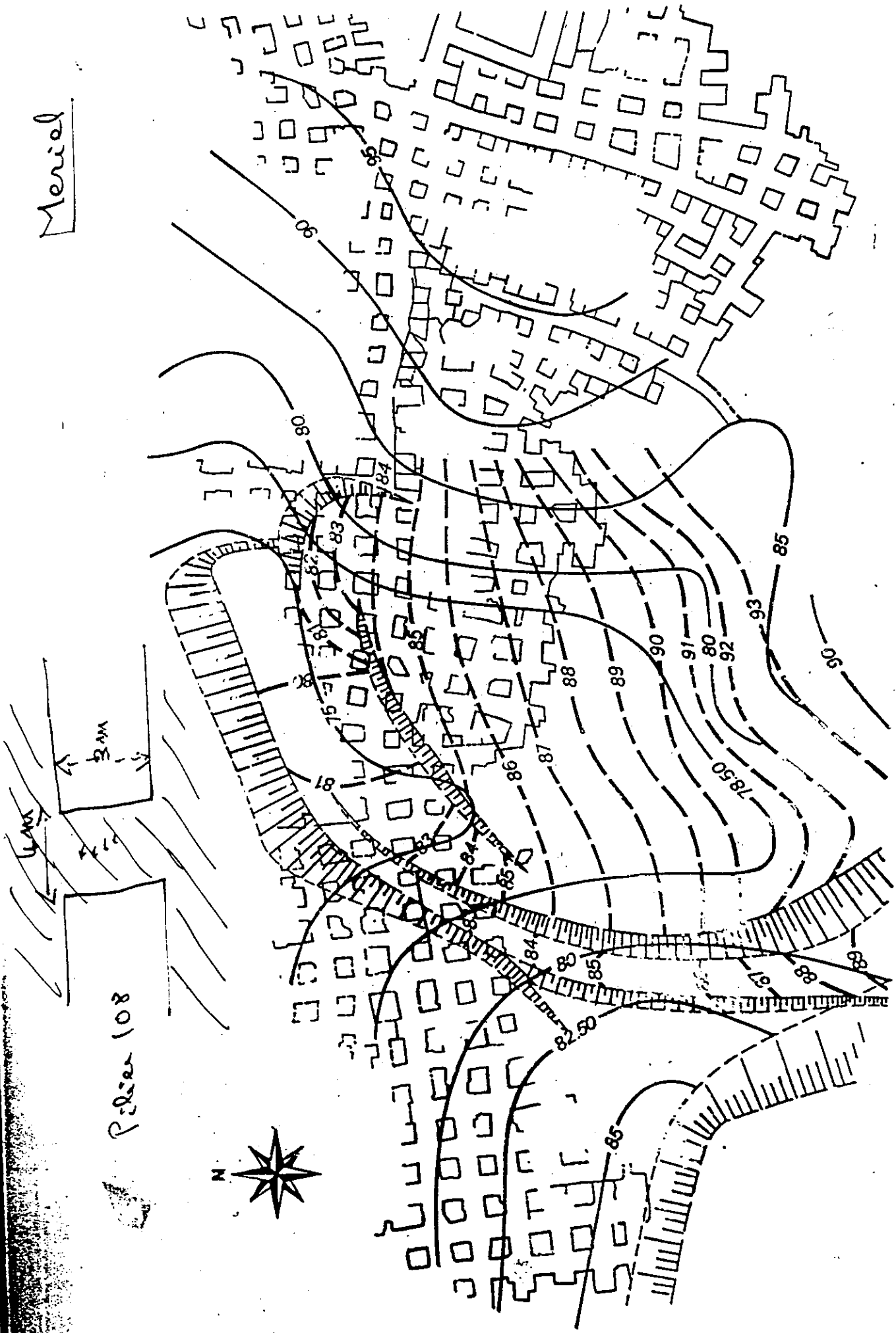
La carrière de Mériel.

The Mériel quarry

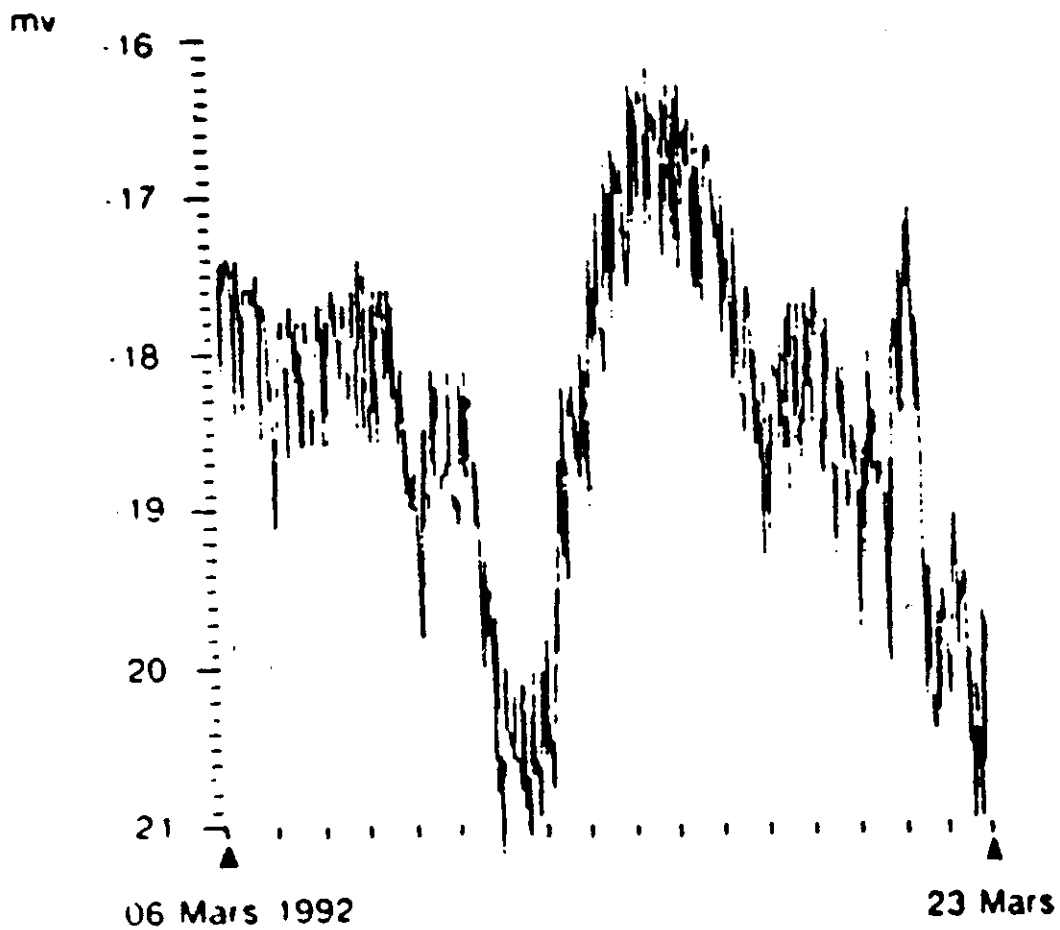
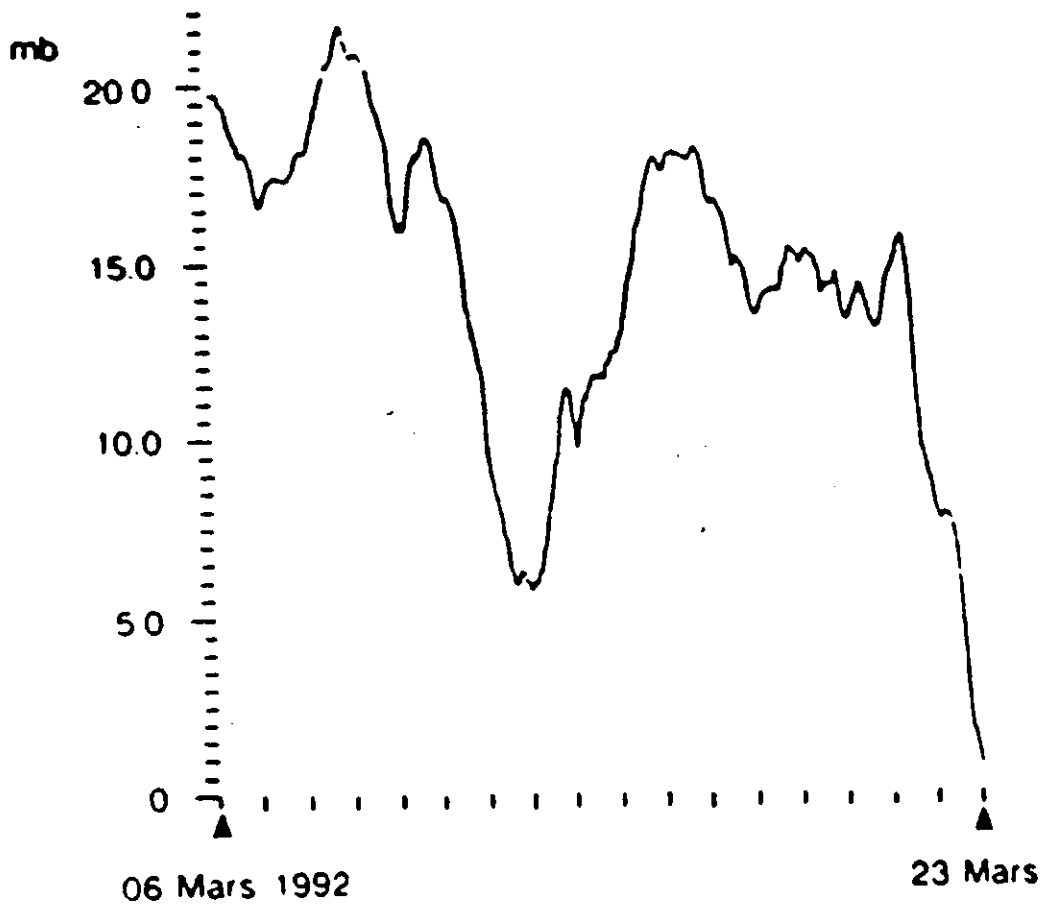


Top : situation of the lime stone Meriel quarry.
Bottom : vertical section

Meriel



Map of the quarry

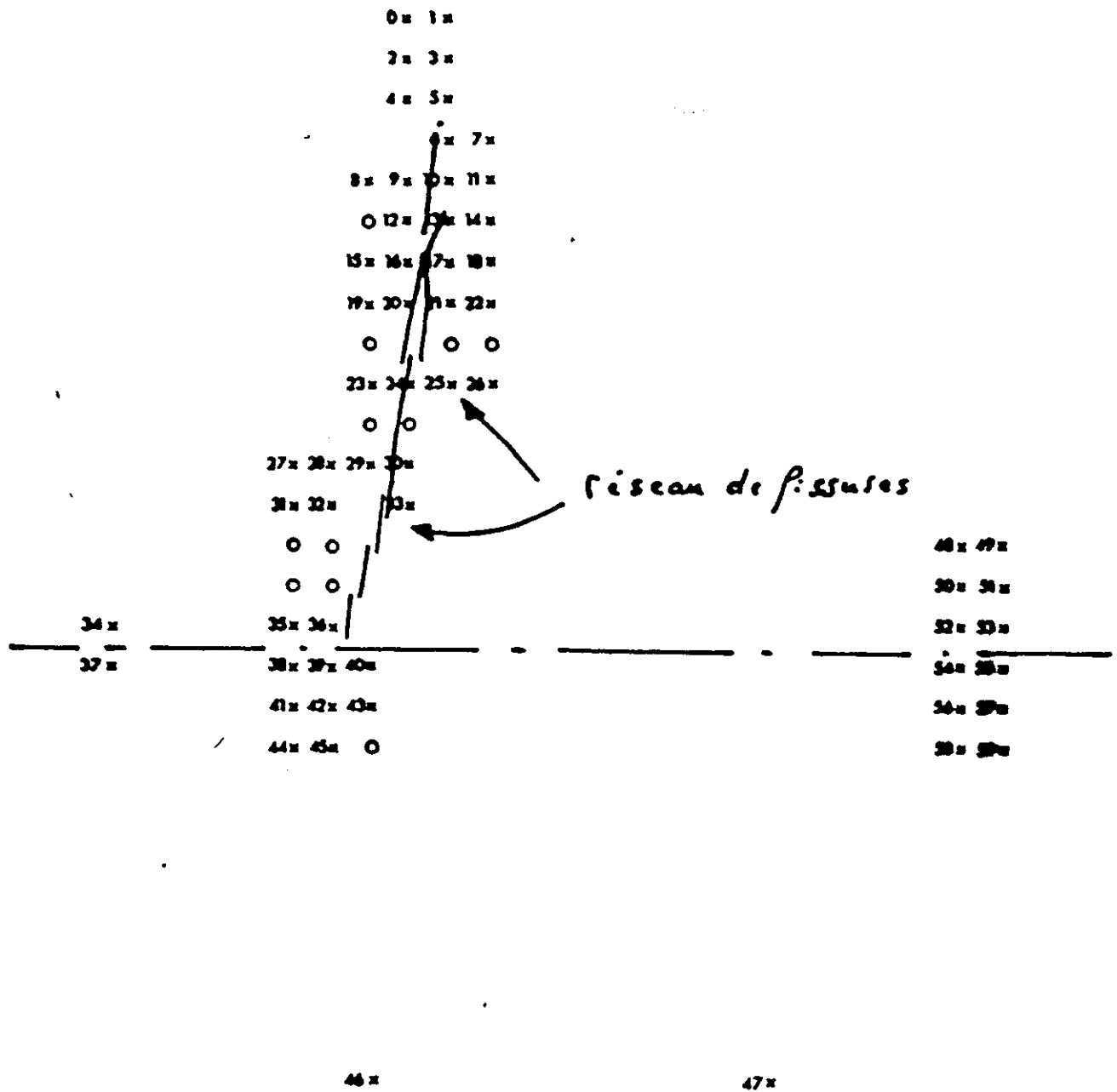


Experiments on pillar 49 in March 92.

Top : Variation of the atmospheric pressure in the gallery.

Bottom ; Simultaneous variation of the spontaneous potential on the wall of the pillar.

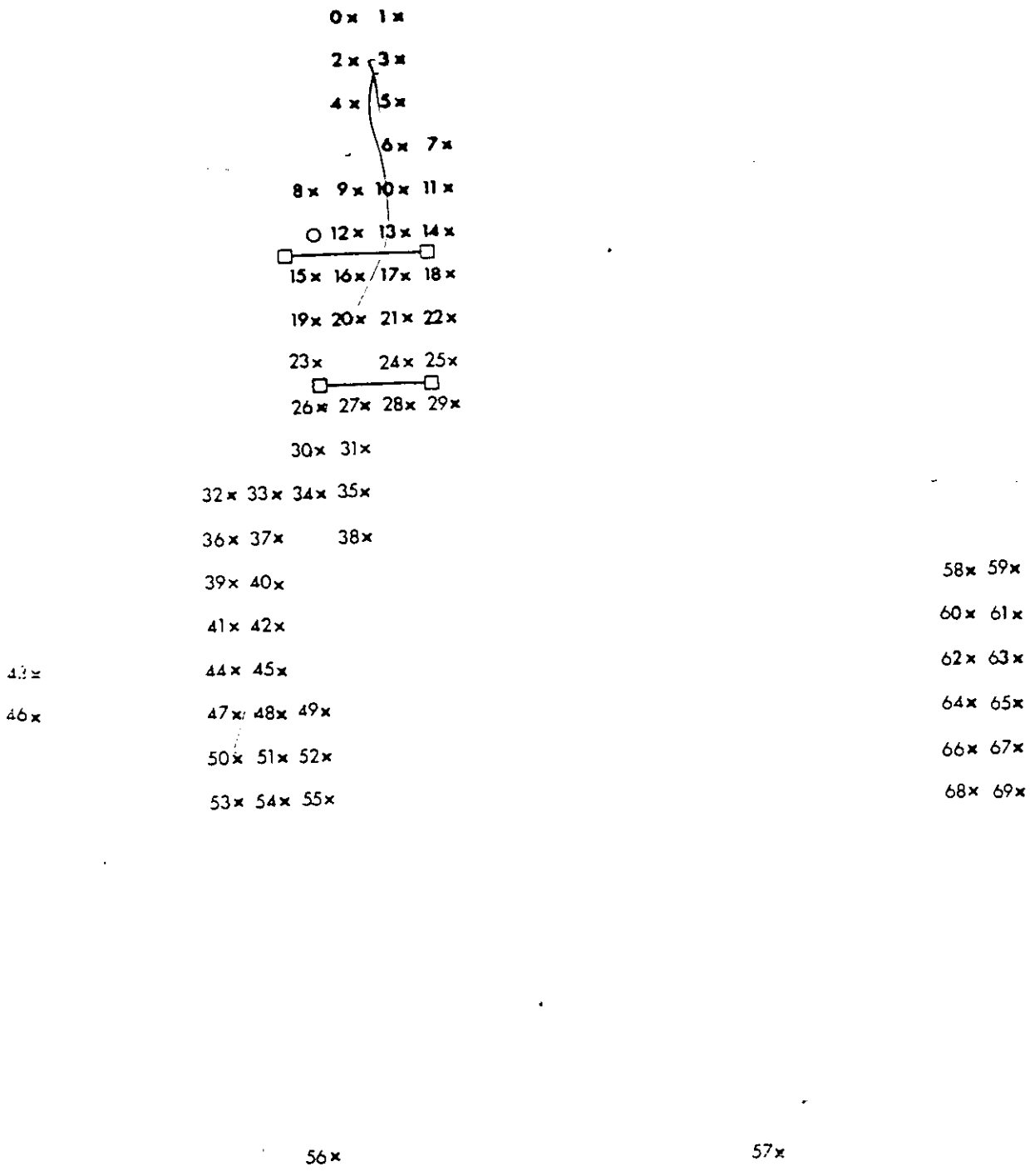
Apparent fissures and the array of electrodes on pillar 108.



Schema du dispositif de mesures sur le pilier 108 (au 1.7.92)

Les electrodes 46 et 47 sont espacées de 50 cm
 et la maille élémentaire est de 5 cm
 ——— niveau de la discontinuité mécanique

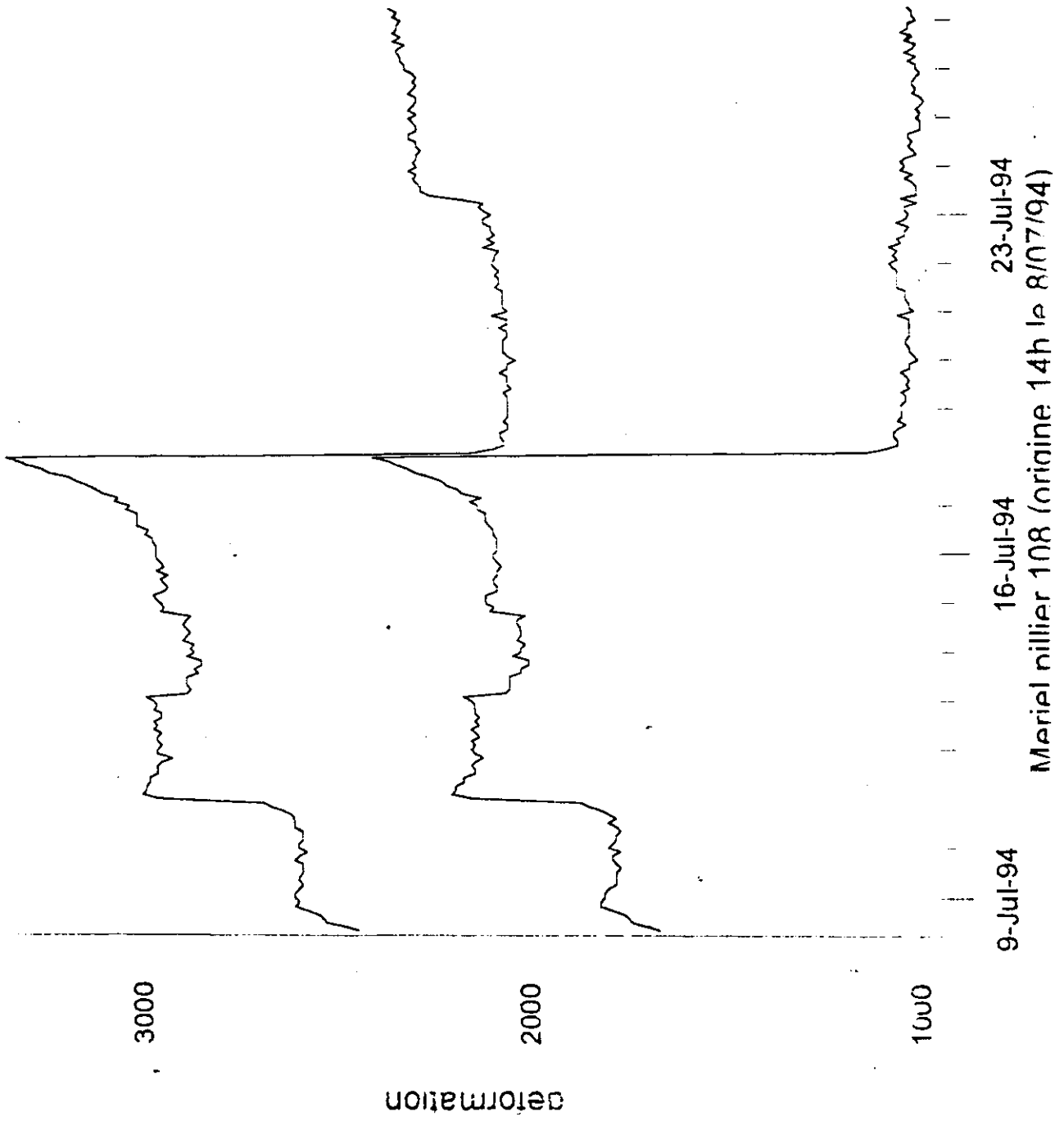
The array of electrodes and the two extensometers through the fissures.



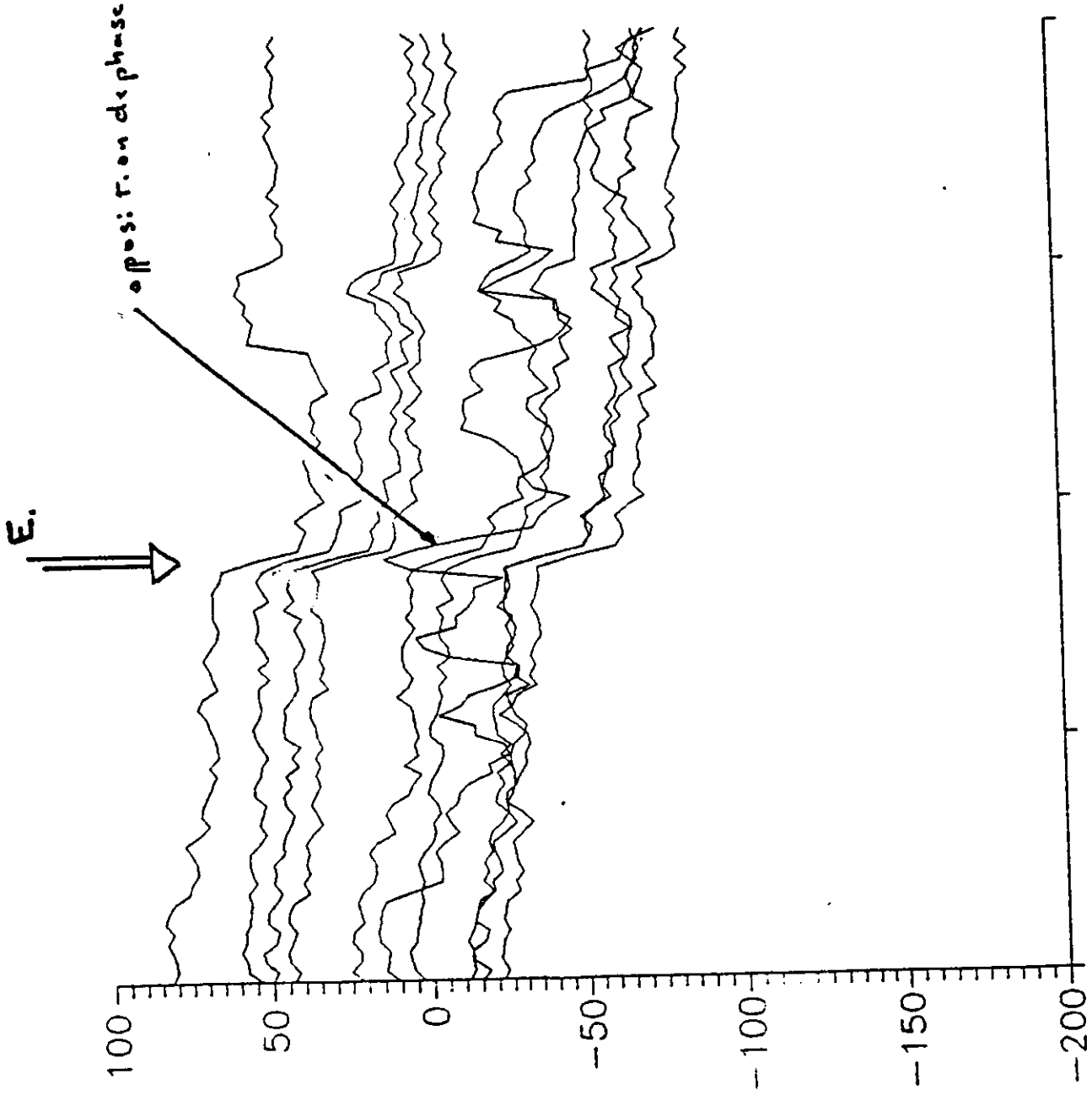
SCHEMA DU DISPOSITIF DE MESURES SUR LE PILIER 108 (1994)

x Electrodes
 □ Emplacements des extensometres

Strain variations - on the two extensometers - in July 94, and the big event of July 18. The sampling rate is one point per hour

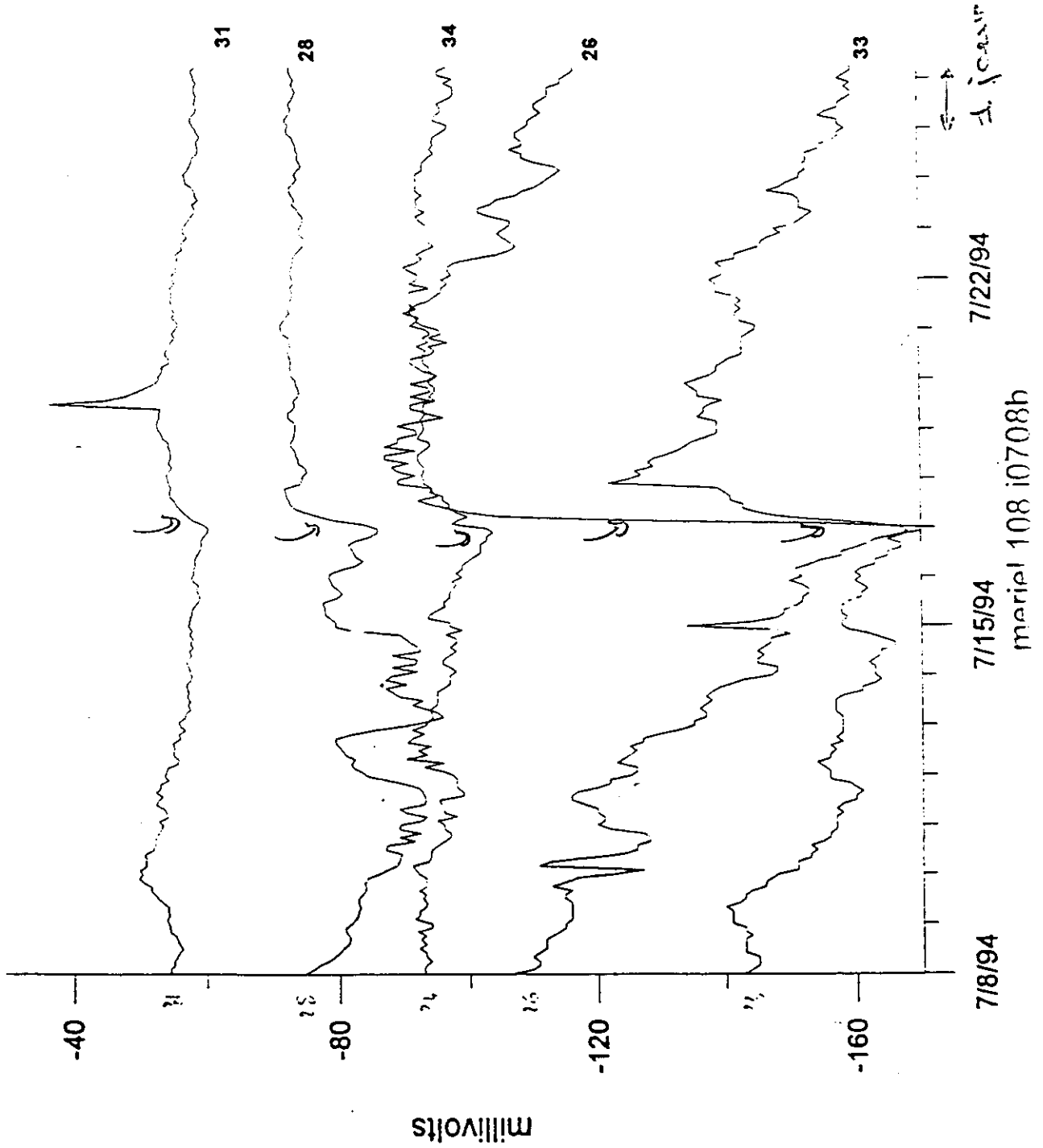


e108/0618160005
voies 10 a 13
abs jours
ord mV

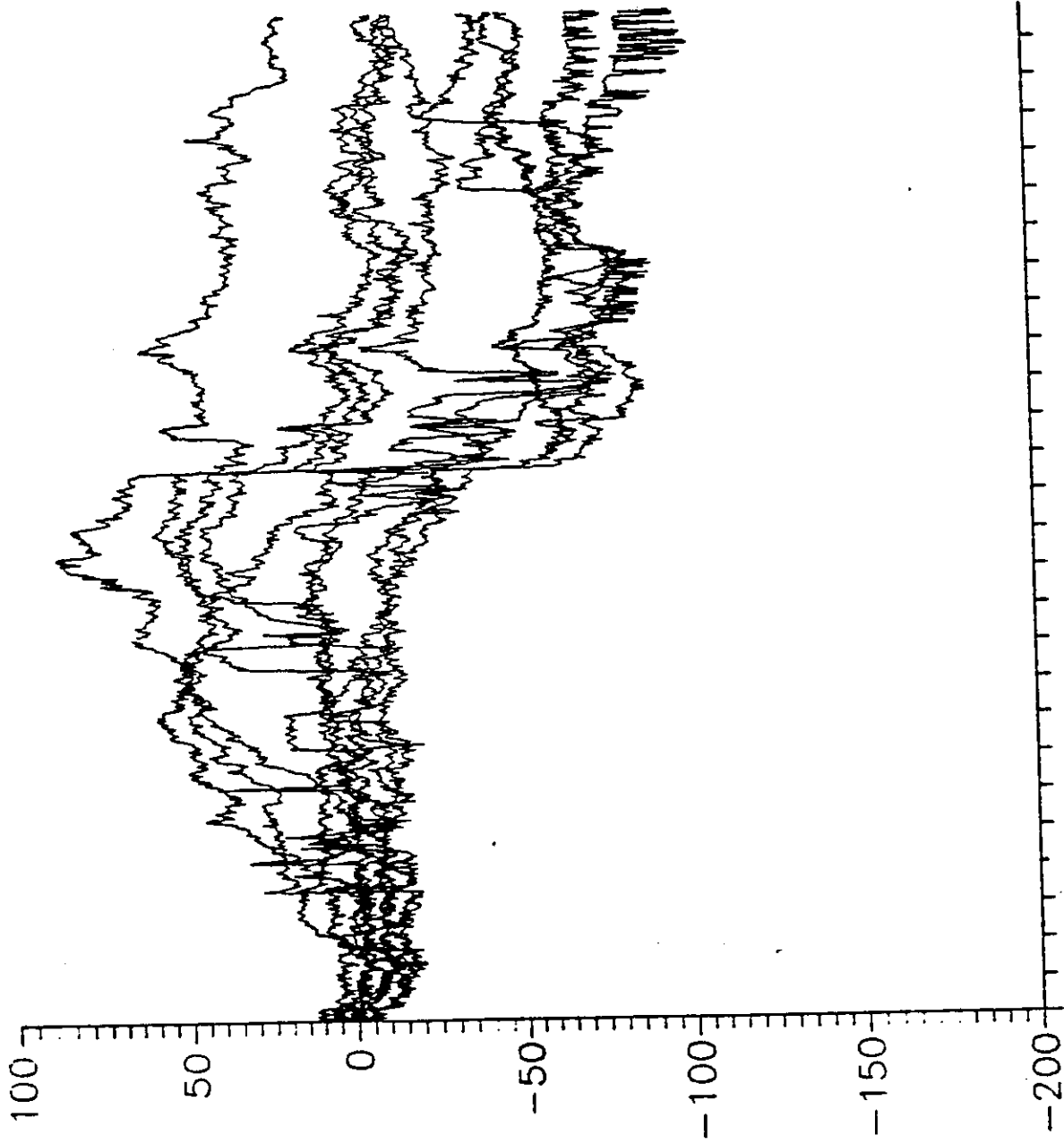


Corresponding variations of some electric potential differences on the same time span.

Other differences. The July 18 event is conspicuous.



More electric potential recordings



e108/0618160005
voies 10 a 19
abs jours
ord mV

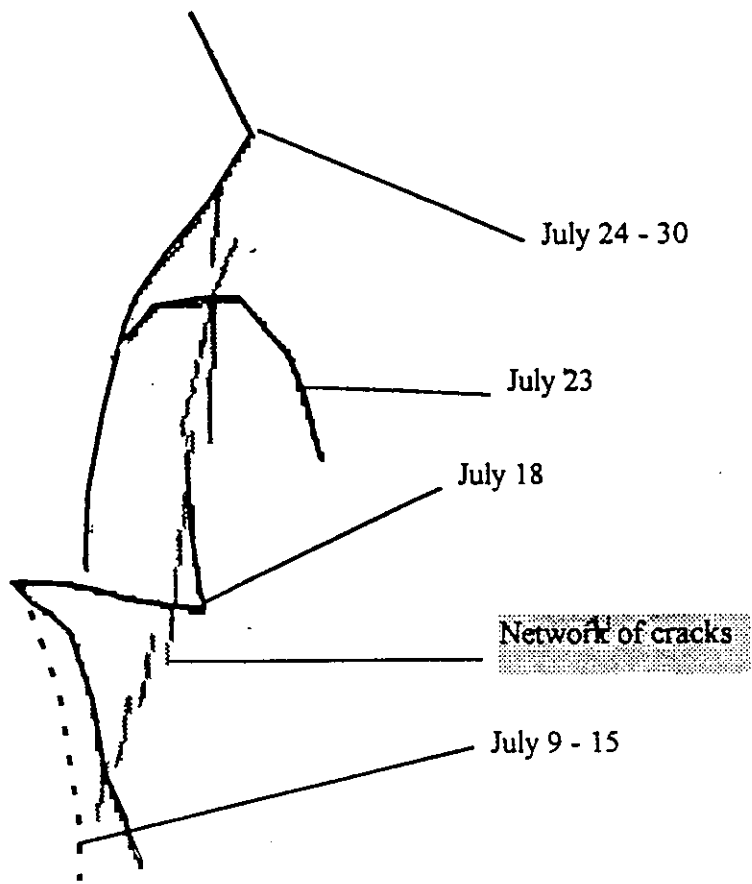


Fig.5. "Sensitive areas" for the period of two main events of July, 1994

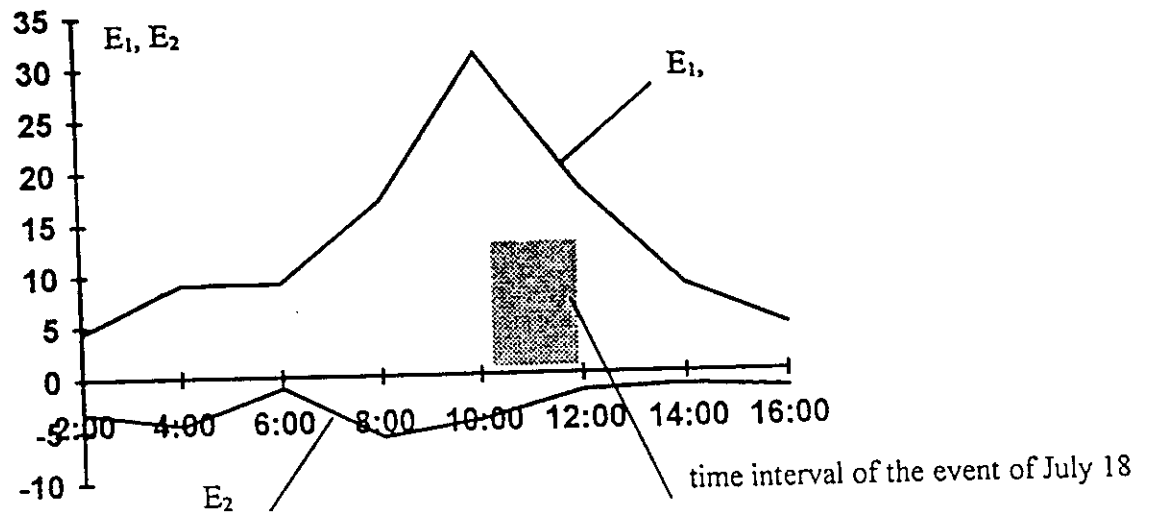
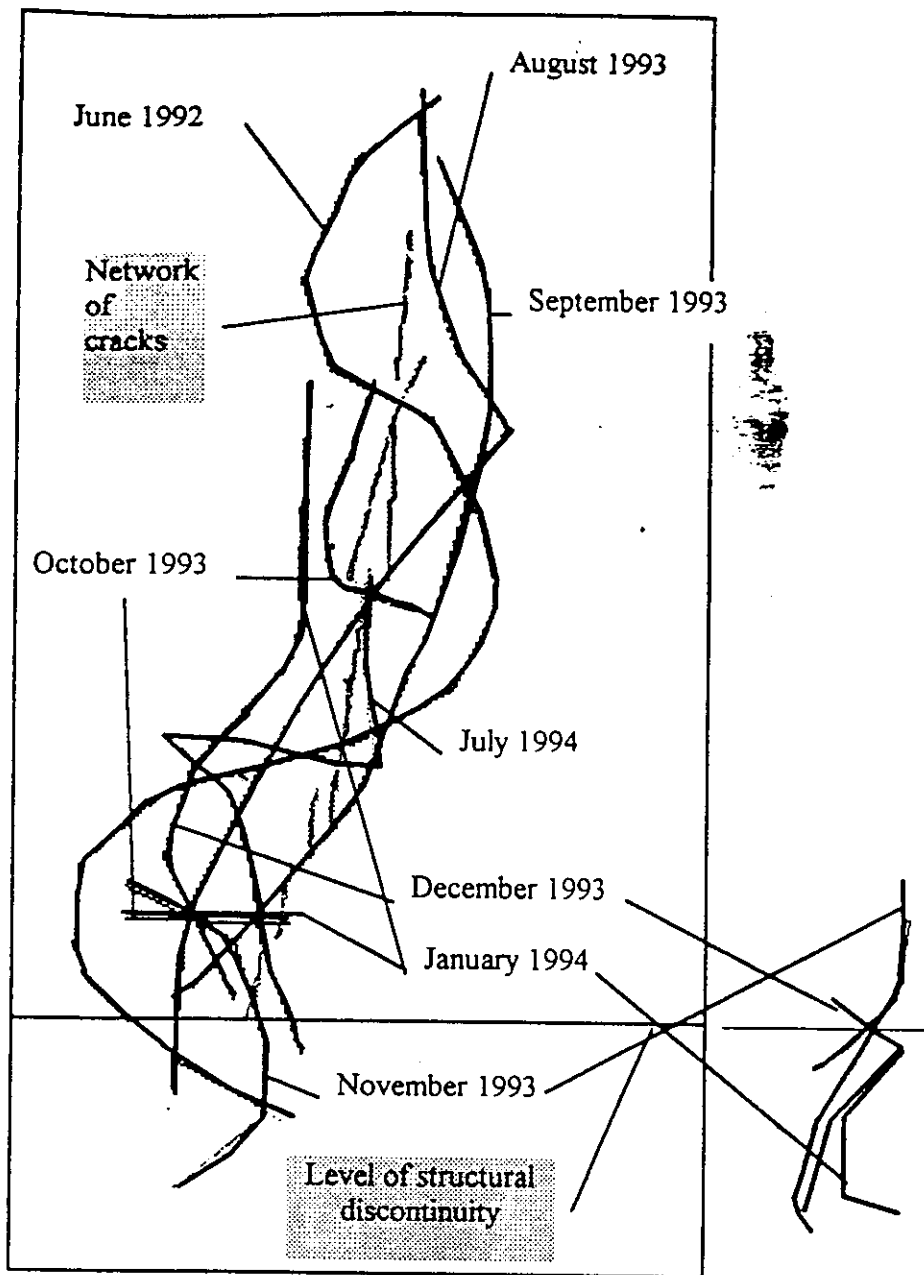
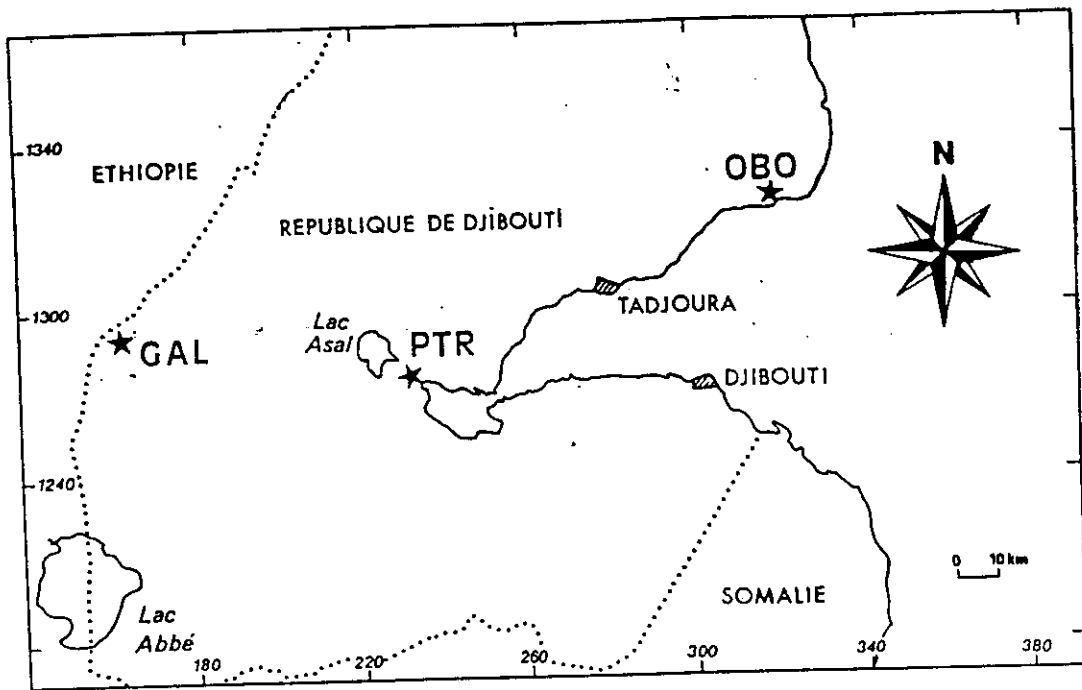


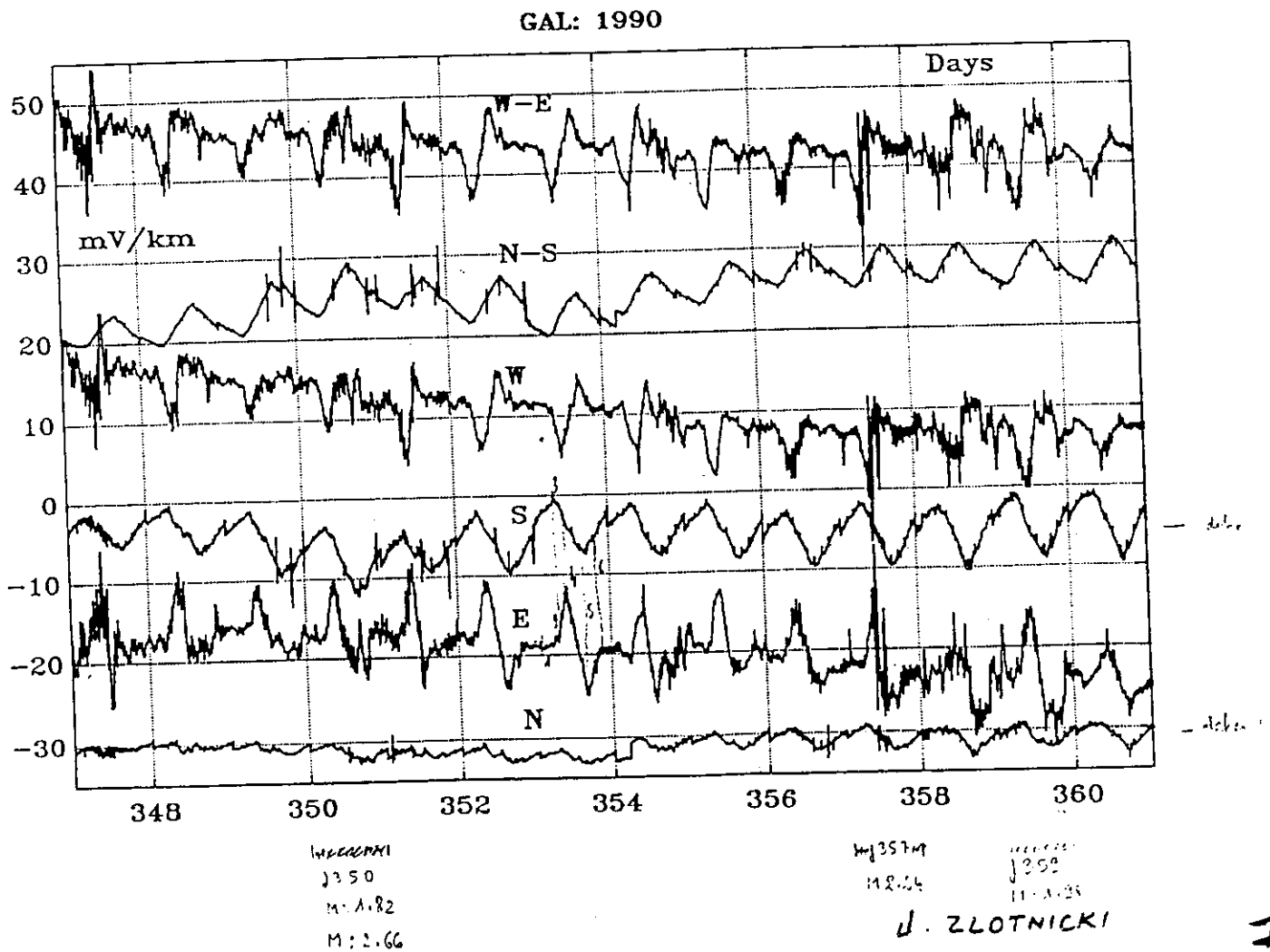
Fig.7. Extrema of the SP changes over the whole array of electrodes on July 18, 1994



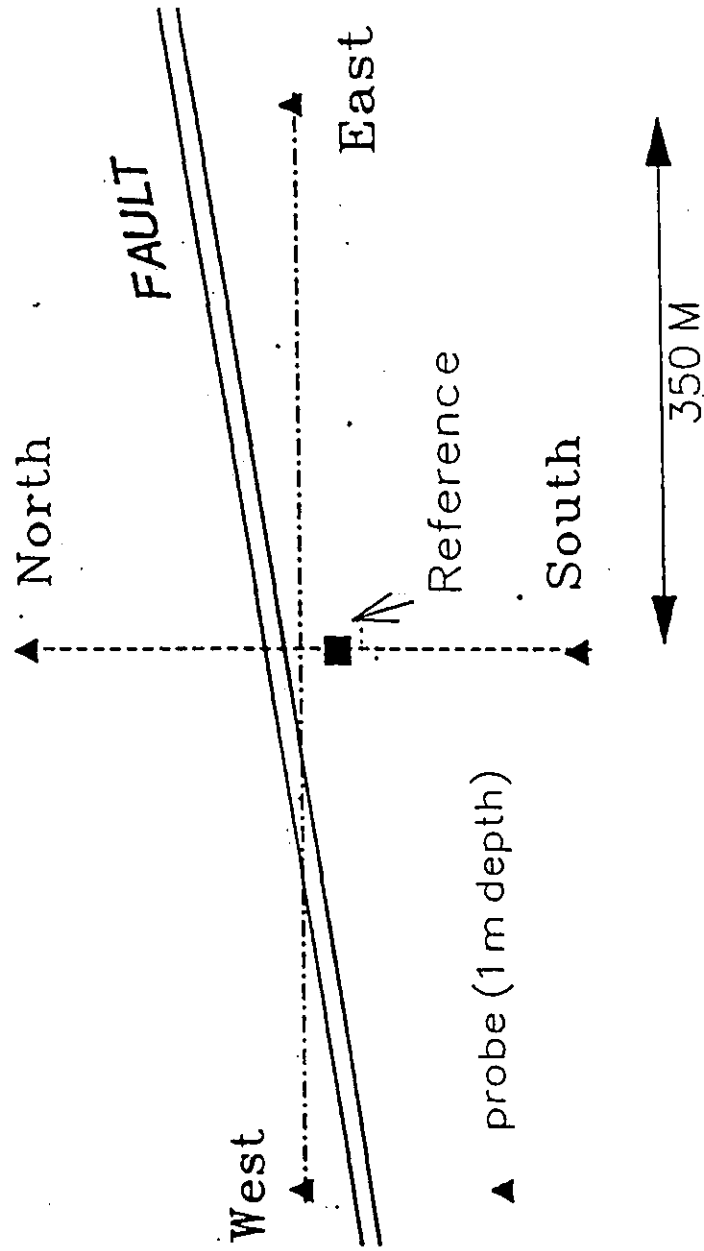
a) b)
 Fig. 6. Migration of the "sensitive area" in 1992 - 1994:
 a) - within the main array of electrodes
 b) - within remote array



Top. Djibouti Republic map.
 Bottom. Recordings - at GAL station - of the regular daily ionospheric variation of the electric field.

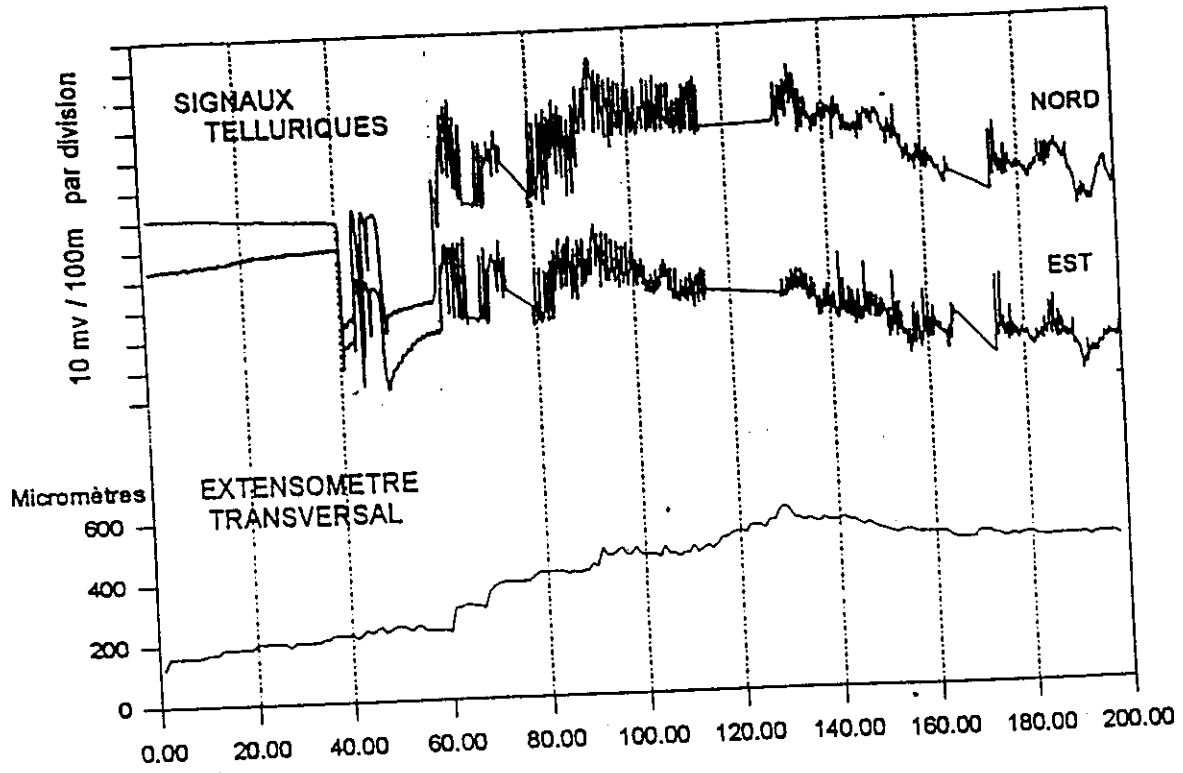


PETIT-RIFT (DJIBOUTI)



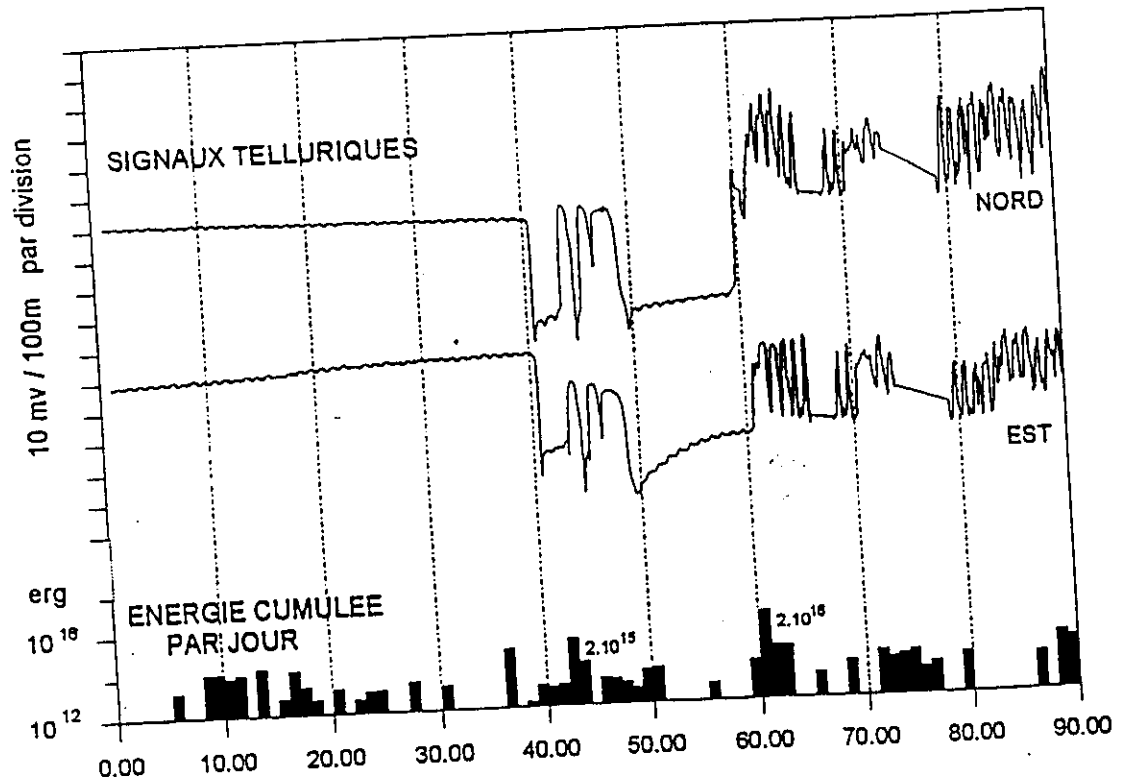
The electric recording device at PTR station. Electrodes are Pb-PbCl.

RELATION DEFORMATION - SIGNAUX ELECTRIQUES
01 Janvier - 28 Juillet 1991

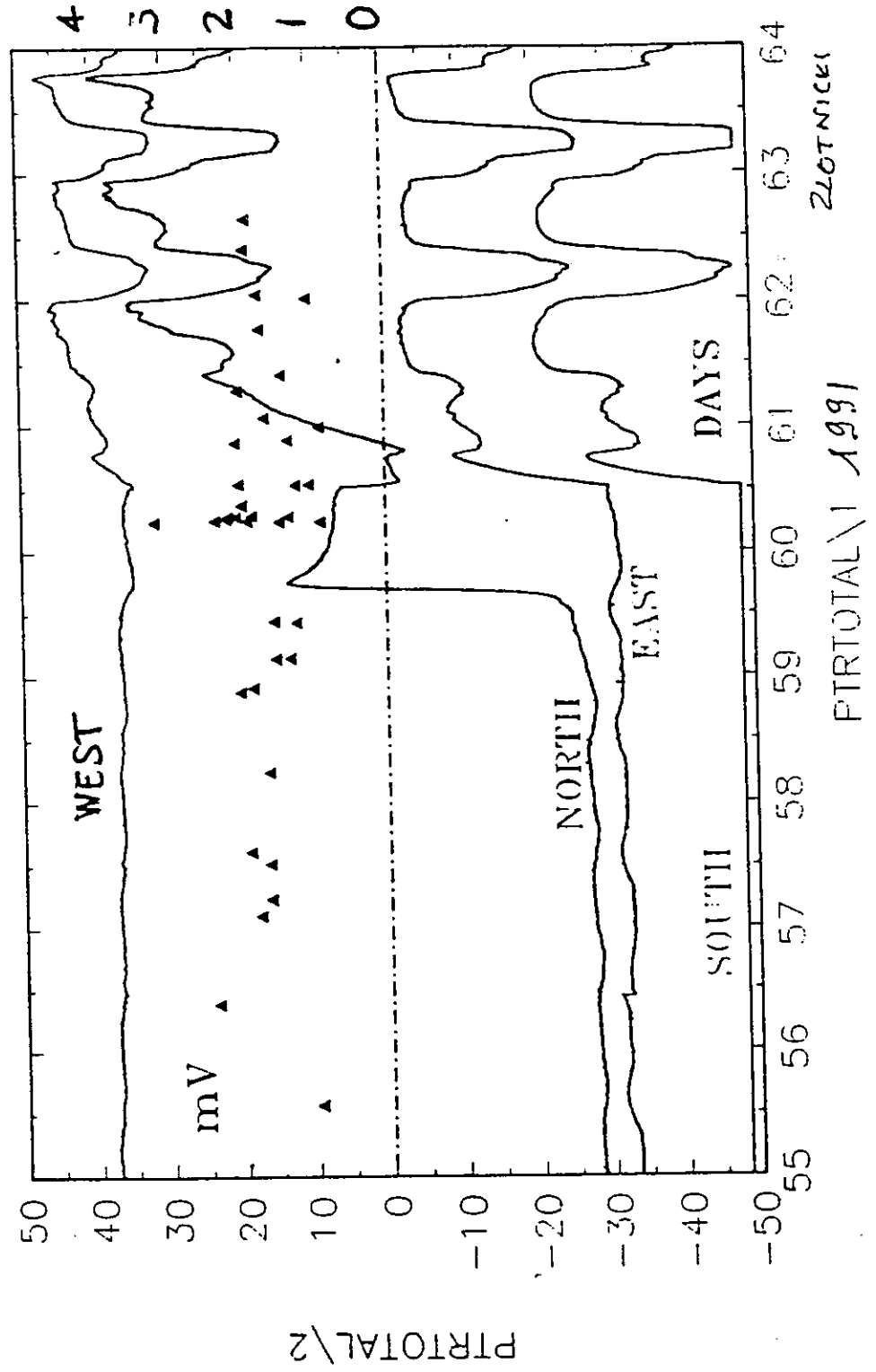


Magnification of the daily variation after day 40 (before day 40 this daily variation is hardly visible).

RELATION SISMICITE - SIGNAUX ELECTRIQUES
01 Janvier - 31 Mars 1991



Blow up of the day 55 - day 64 time space.



3.3 CONCLUSION

La région de la Fête Céleste est un site à haut risque sismique, et se trouve à proximité d'une région densément peuplée. Il a en conséquence été choisi comme site d'études pluridisciplinaires au sein desquelles s'intègrent les études électromagnétiques menées par le laboratoire de géophysique d'Orléans et l'Institut de Physique du Globe de Paris.

Une station d'enregistrement électromagnétique a été installée à la fin de Septembre 1994, à l'ouest de la ville de Tianzhu, à proximité d'un segment de la faille (figures 3-1 et 3-2). Cette station est du même type que celle implantée en Grande Terre de l'Archipel de Guadeloupe, et son instrumentation est la suivante:

- Mesure de composantes magnétiques horizontales D (variations de direction est-ouest) et H (variations de direction nord-sud).
- Mesure de composantes électriques horizontales est-ouest et nord-sud.

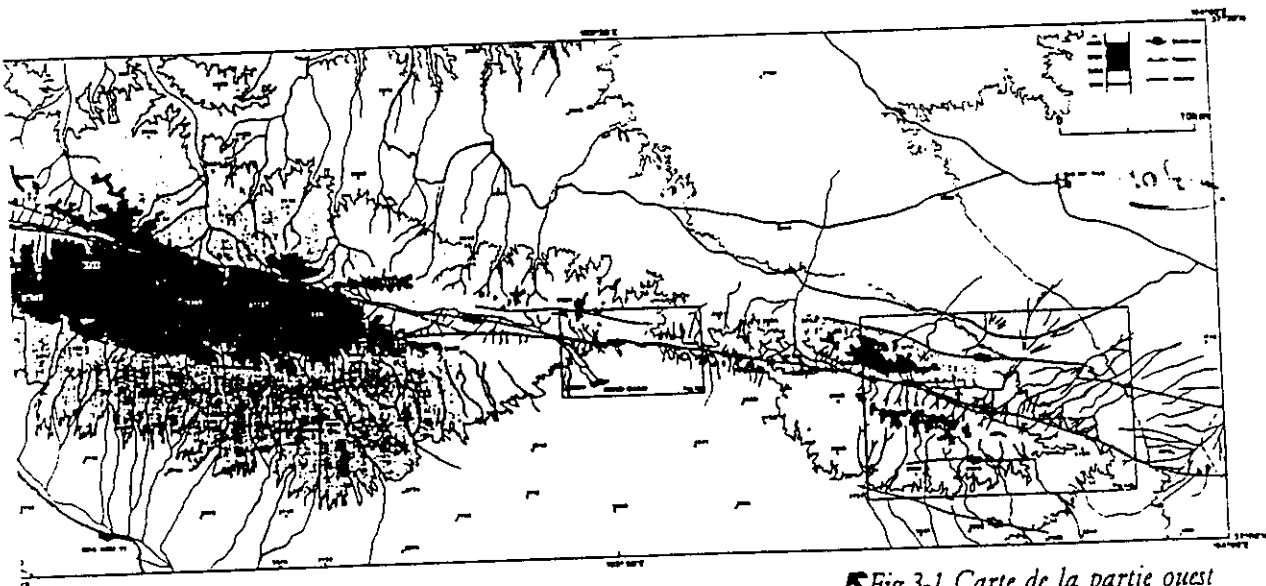


Fig. 3-1 Carte de la partie ouest de la faille de Haiyuan, le long de Maomao et Lao Hu Shan, à l'est du bassin en pull-apart de Tianzhu (agrandissement de l'encadré de la figure 1-3).

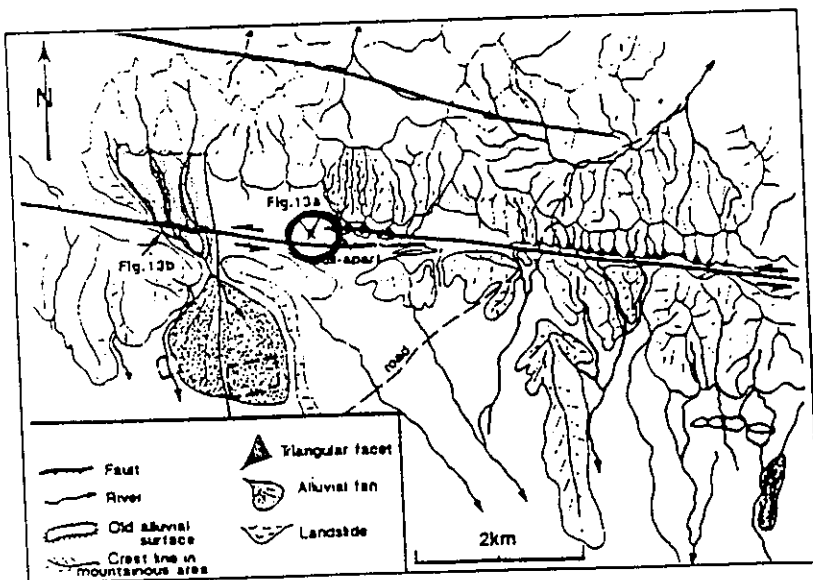


Fig. 3-2: Agrandissement de l'encadré de la figure 3-1 et position de la station d'enregistrement électromagnétique LGO-IPGP est symbolisée par le cercle plein (d'après Gaudemer et al., 1995).

Latitude Nord (°)

Horizontal magnetic components
D, H
Electric field N-S, E-W

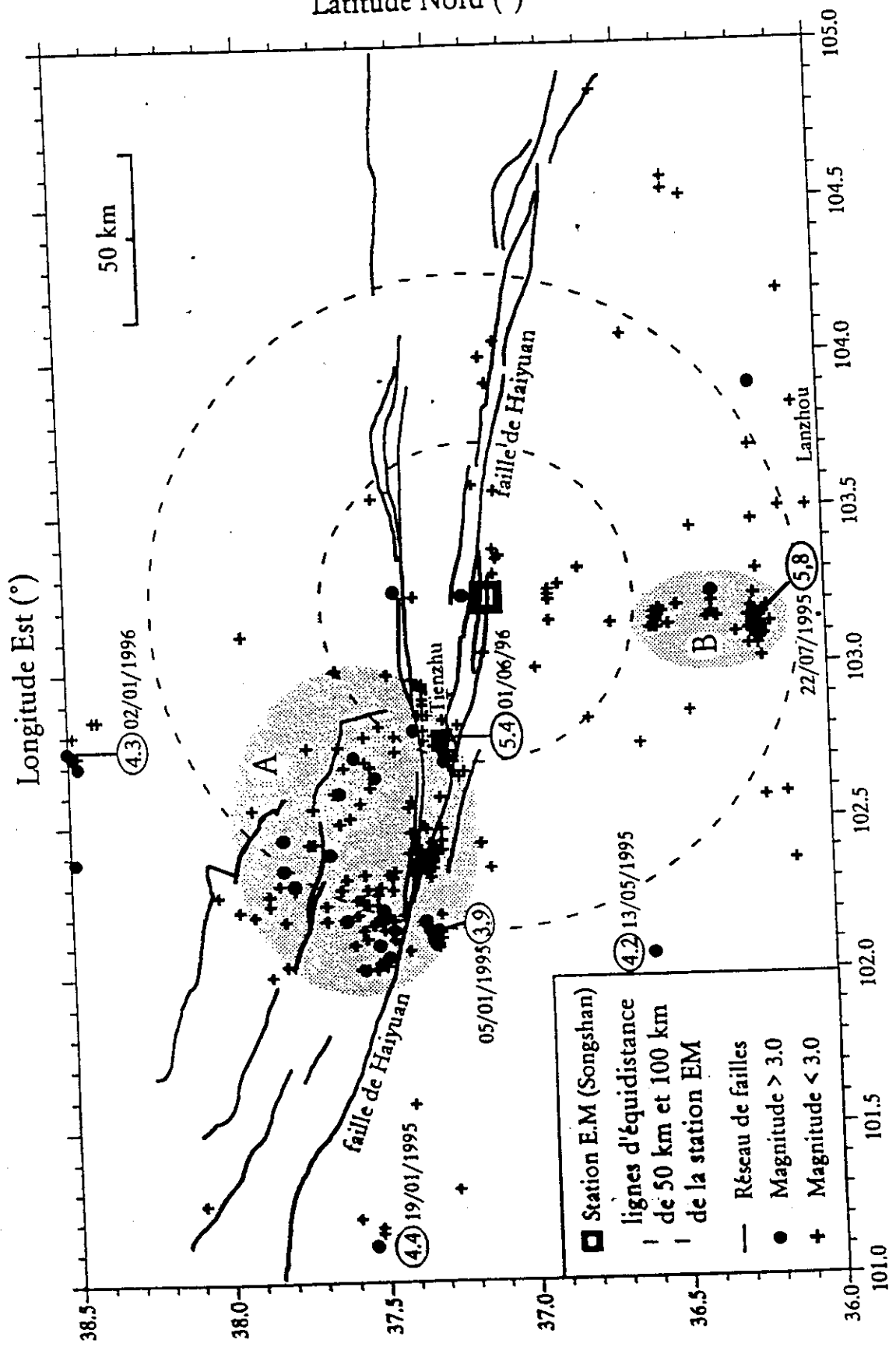


Fig.1-1: Cartographie des epicentres des seismes enregistrés dans la région de la faïlle de Haiyuan de Janvier 1995 à Juin 1996 (d'après les données du réseau sismique régional chinois)

Variation of the apparent resistivity (different estimation) over a two years time-span. A linear decrease (-1% in two years) is observed.

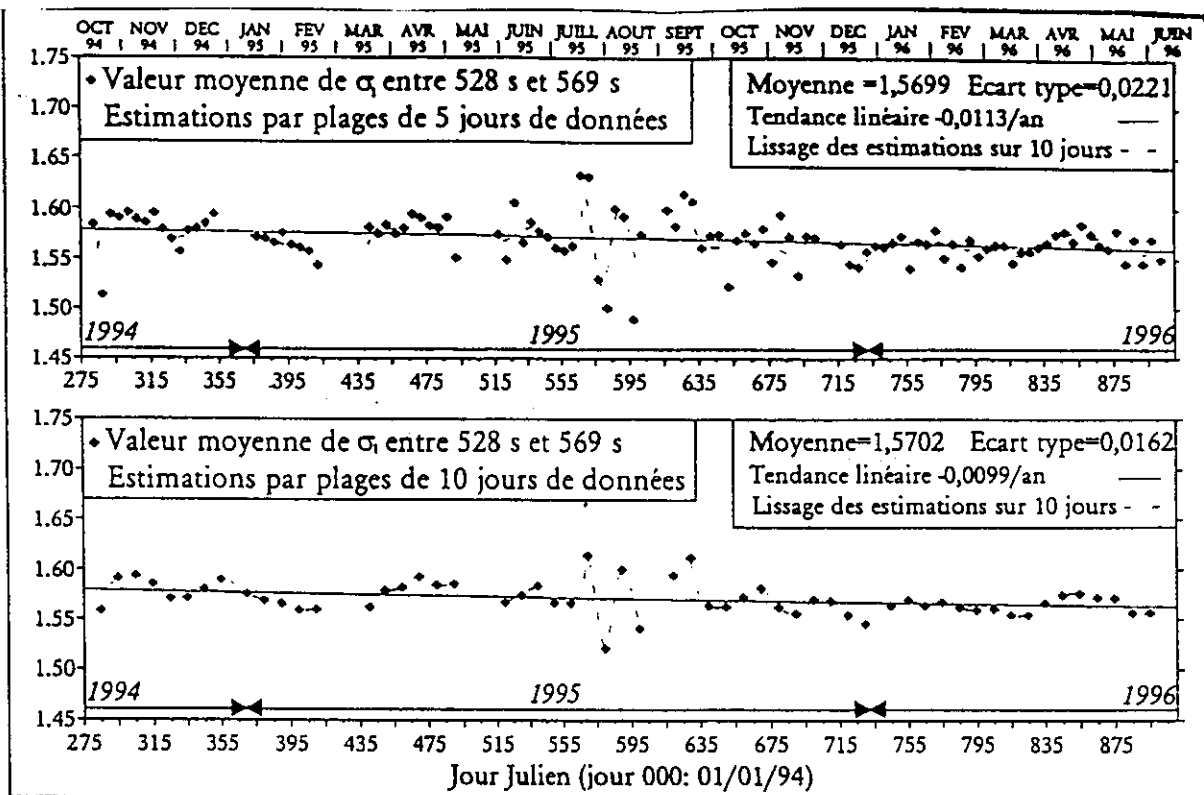


Fig.4-7: Valeurs moyennes des paramètres de transfert d'énergie calculées sur les périodes 903, 960 et 1024 secondes. Les estimations sont sur des séries indépendantes de 10 jours (graphique du bas) à ou de 5 jours (graphique du haut) de données. Les variations continues sur 10 jours restent continues sur 5 jours.

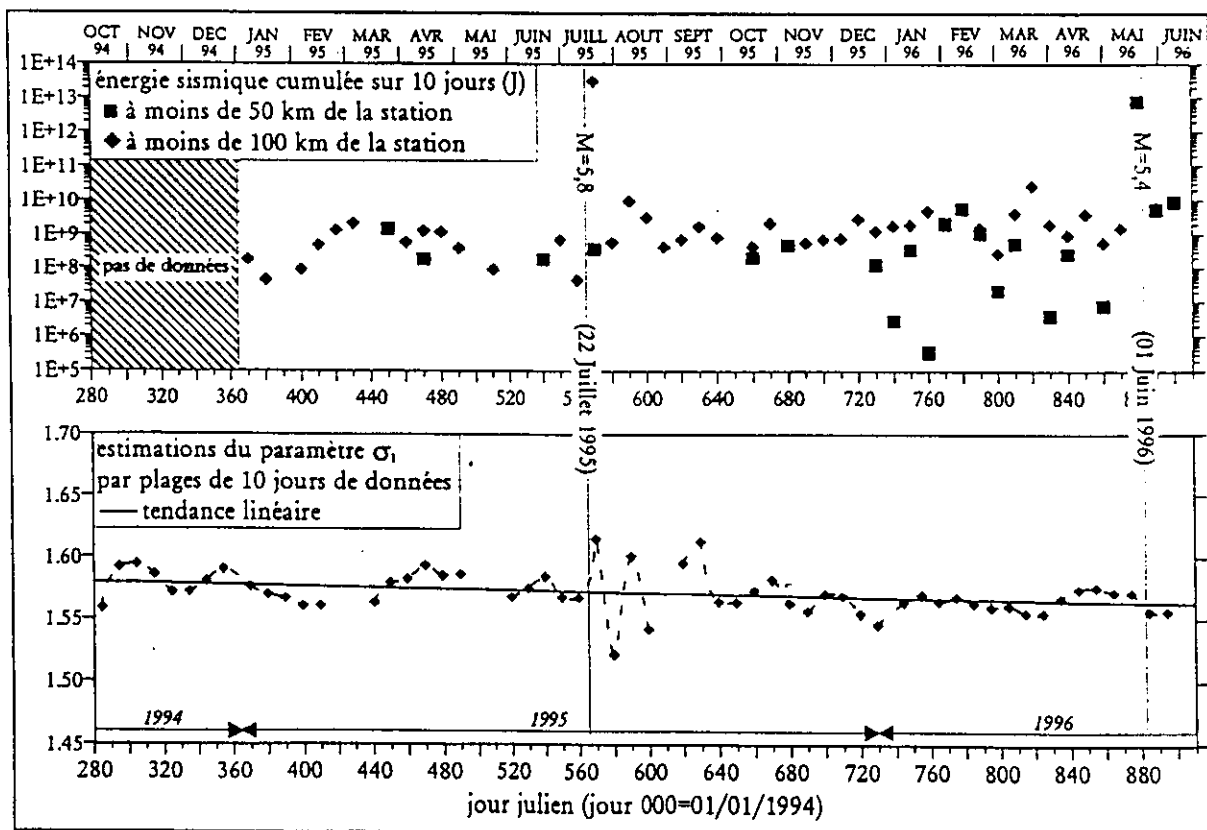


Fig.4-8: Valeurs moyennes des paramètres de transfert d'énergie (calculées sur les périodes 903, 960 et 1024 secondes) et énergie sismique libérée dans des rayons de 50 km et 100 km autour de la station électromagnétique (valeurs cumulées sur 10 jours).

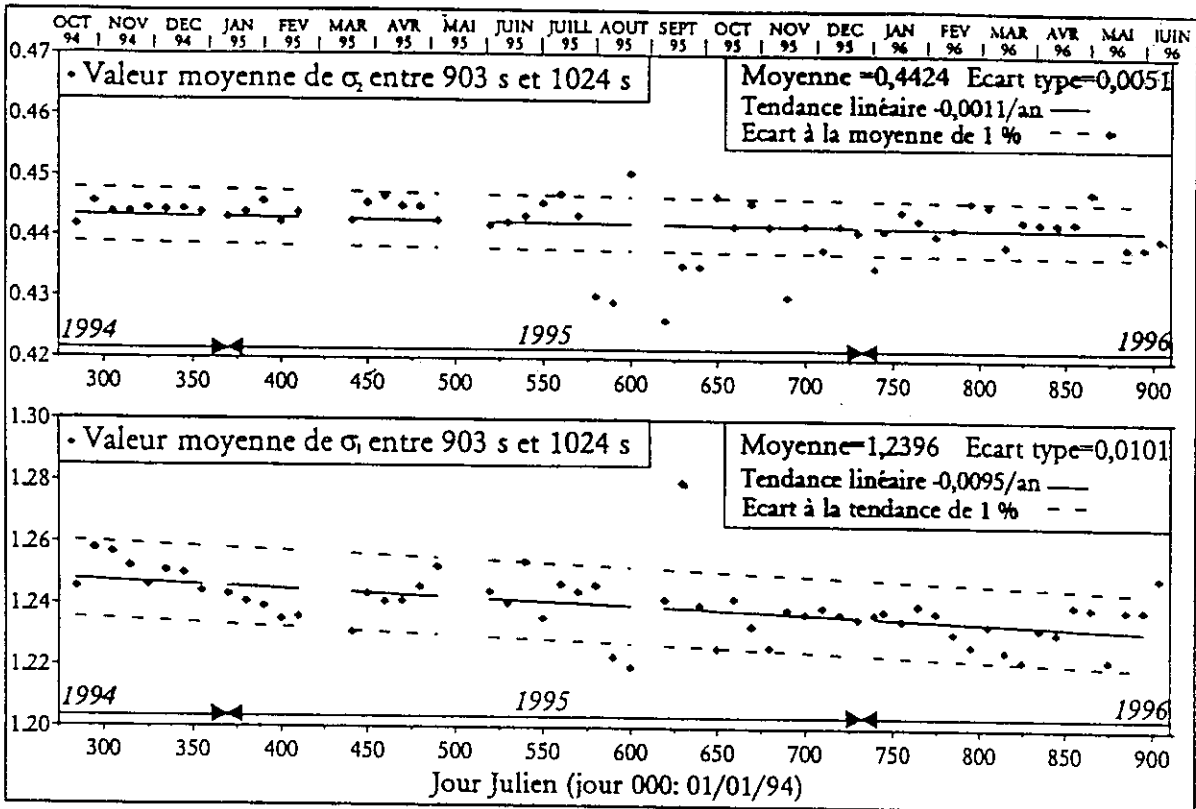


Fig.4-5: Valeurs moyennes des paramètres de transfert d'énergie calculées sur les périodes 903, 960 et 1024 s (les estimations sont réalisées sur des séries de 10 jours de données). Les paramètres statistiques (cadre en haut à droite) sont calculés sur l'ensemble des valeurs obtenues d'Octobre 1994 à Juin 1996.

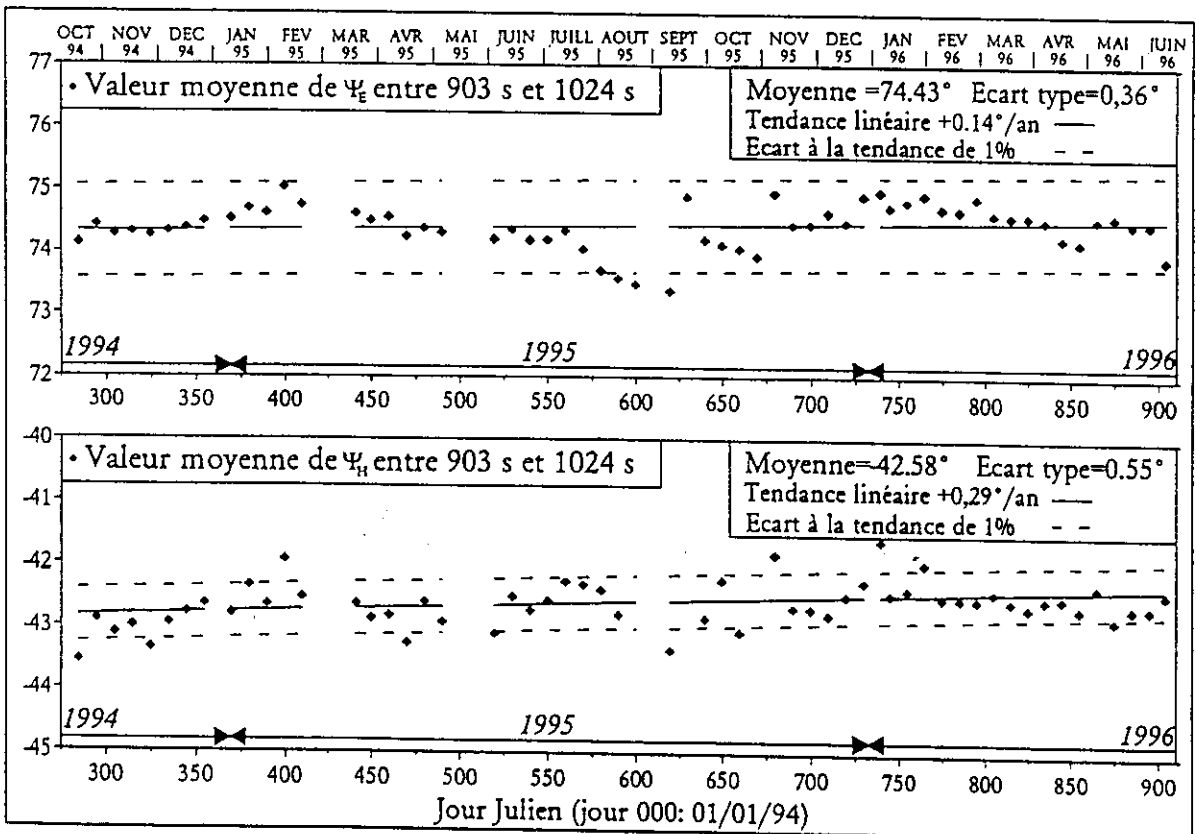
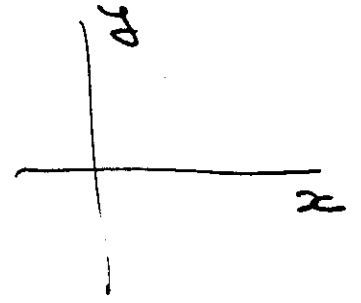


Fig.4-6: Valeurs moyennes des angles principaux d'induction calculées sur les périodes 903, 960 et 1024 s (les estimations sont réalisées sur des séries de 10 jours de données). Les paramètres statistiques (cadre en haut à droite) sont calculés sur l'ensemble des valeurs obtenues d'Octobre 1994 à Juin 1996.

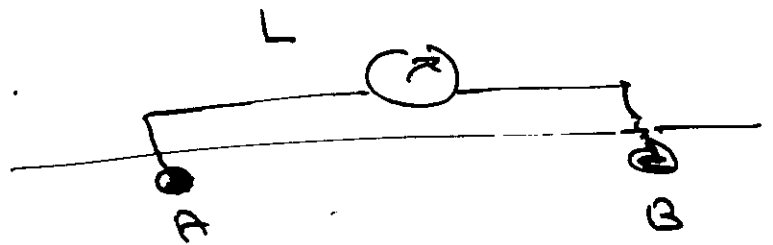
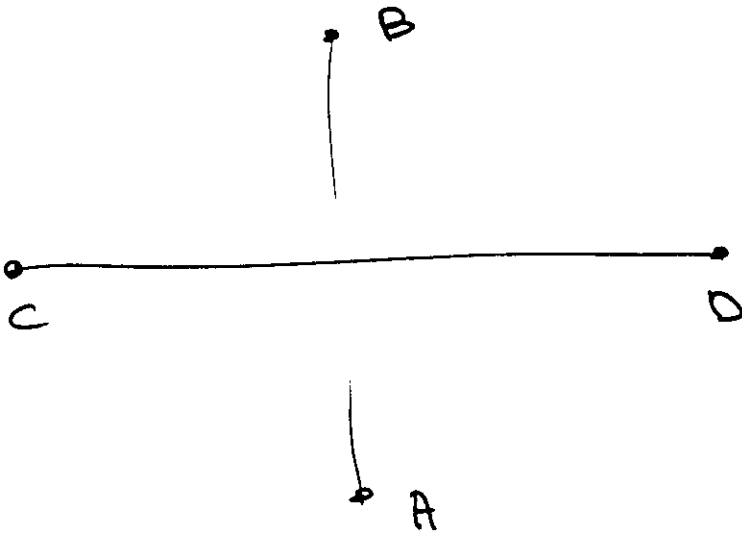
$$\begin{pmatrix} \Pi_x(\omega) \\ \Pi_y(\omega) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Pi(\omega) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x(\omega) \\ H_y(\omega) \end{pmatrix}$$



$$R_x = \Pi_x - (\Pi \cdot H)_x$$

$$R_y = \Pi_y - (\Pi \cdot H)_y$$

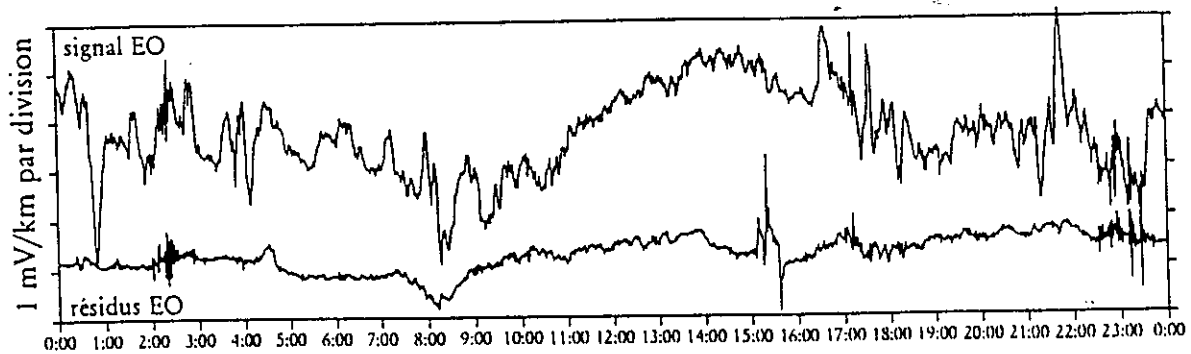
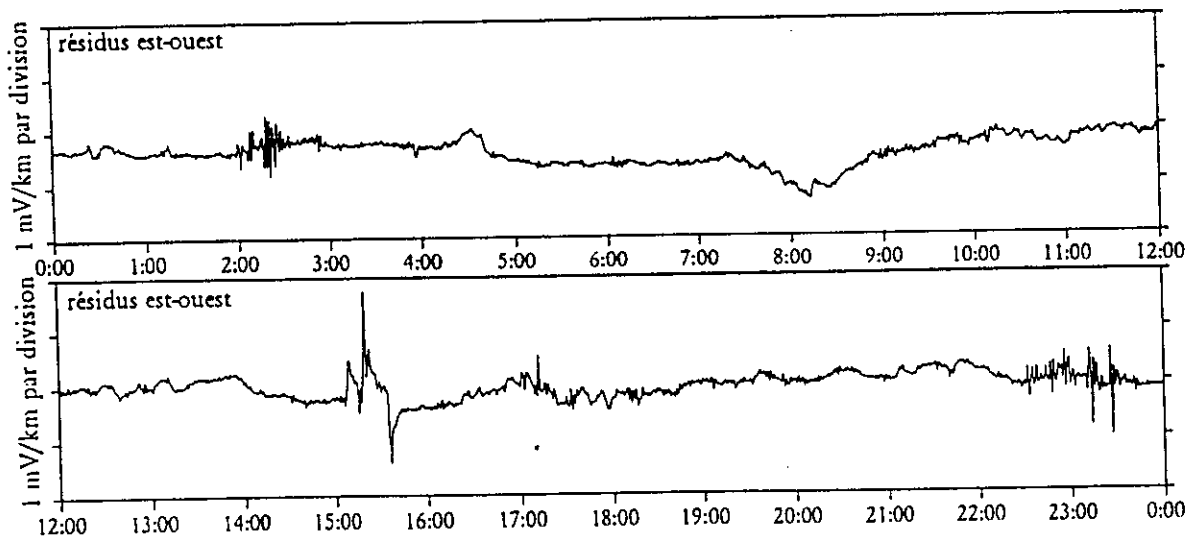
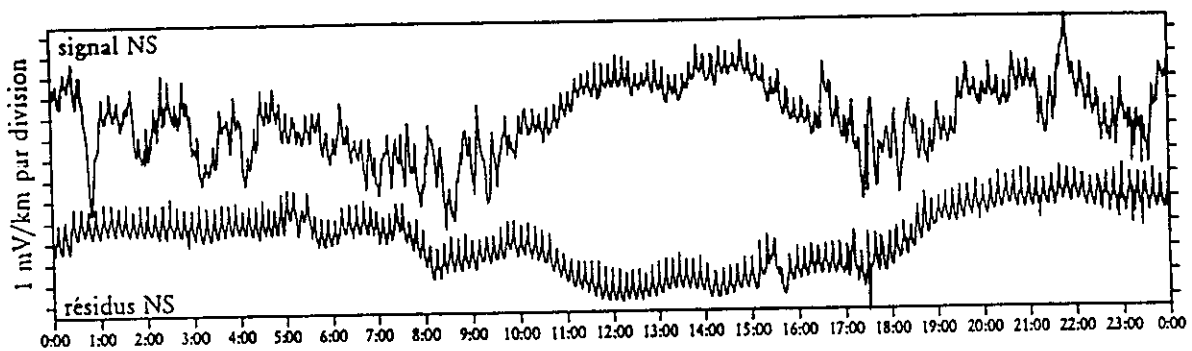
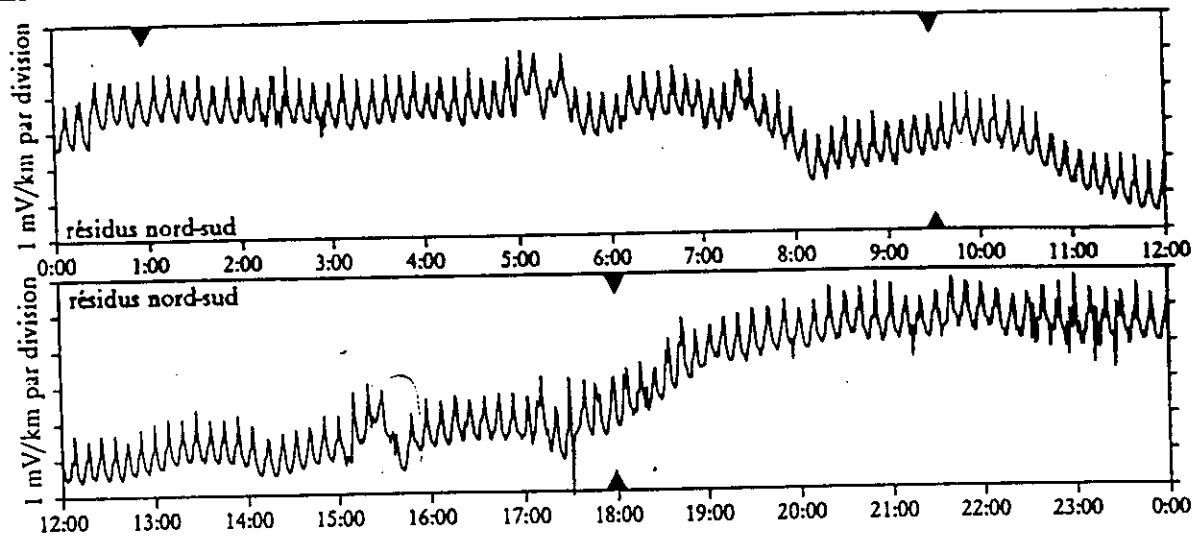
electric
: Residues



$$\Pi_L = \frac{(\psi_B - \psi_A)}{L}$$

The magneto-telluric tensor. Definition of the electric residues. Sketch of the electric lines.

Fig. 5-42: RESIDUS ELECTRIQUES OBTENUS LE 23 JUILLET 1995 (JOUR 204, 1995) | GAMME 61440-120'S



PARTE E ——— Analyse des données sismiques et électromagnétiques du site de Song Shan (Chine)

Fig. 5-39. ~~RÉSIDUS~~ RÉSIDUS ELECTRIQUES OBTENUS LE 20 JUILLET 1995 (JOUR 201, 1995) | GAMME 61440-120 S

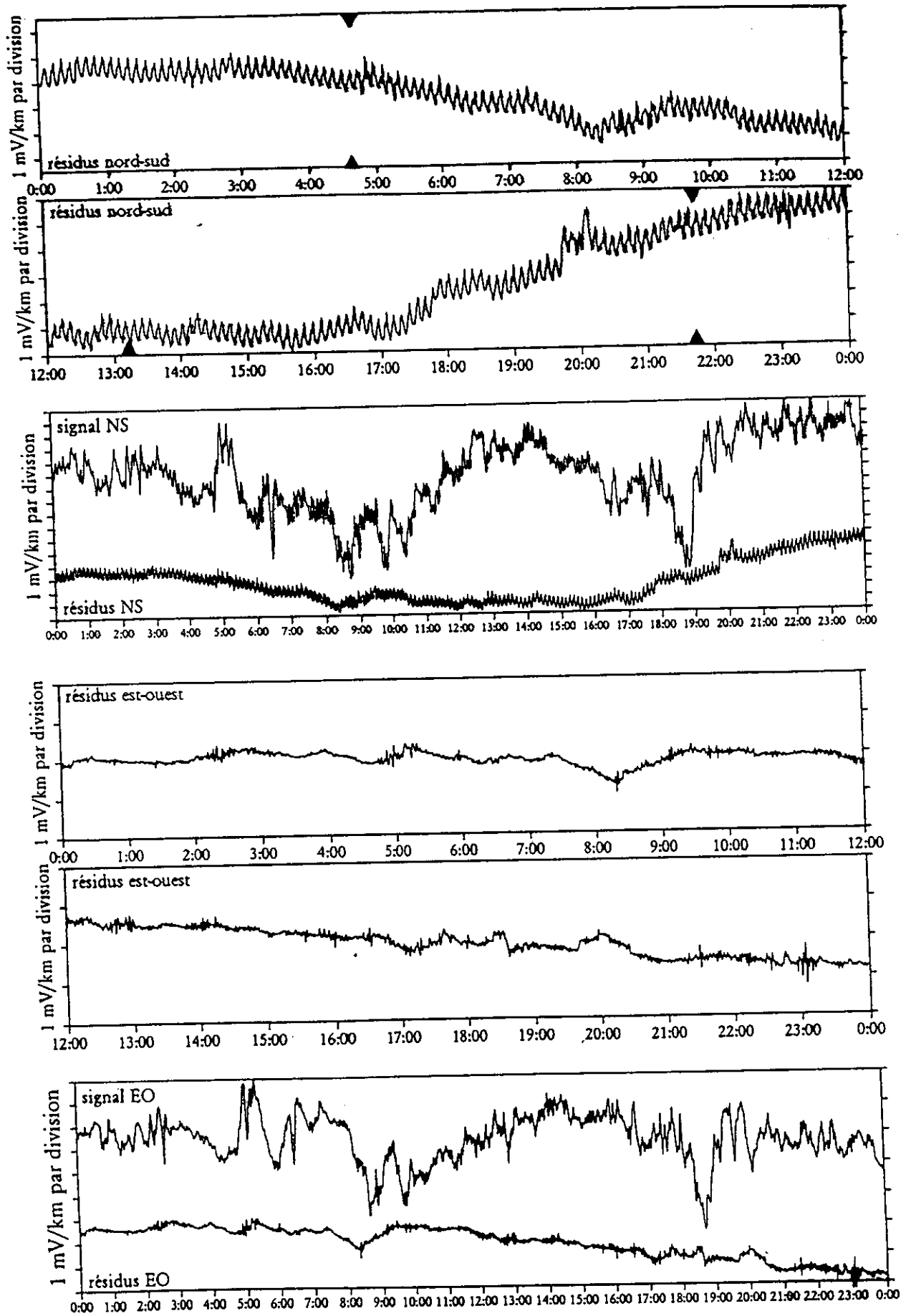


Fig.5-45: RESIDUS ELECTRIQUES OBTENUS LE 04 AOUT 1995 (JOUR 216, 1995) | GAMME 61440-120 S

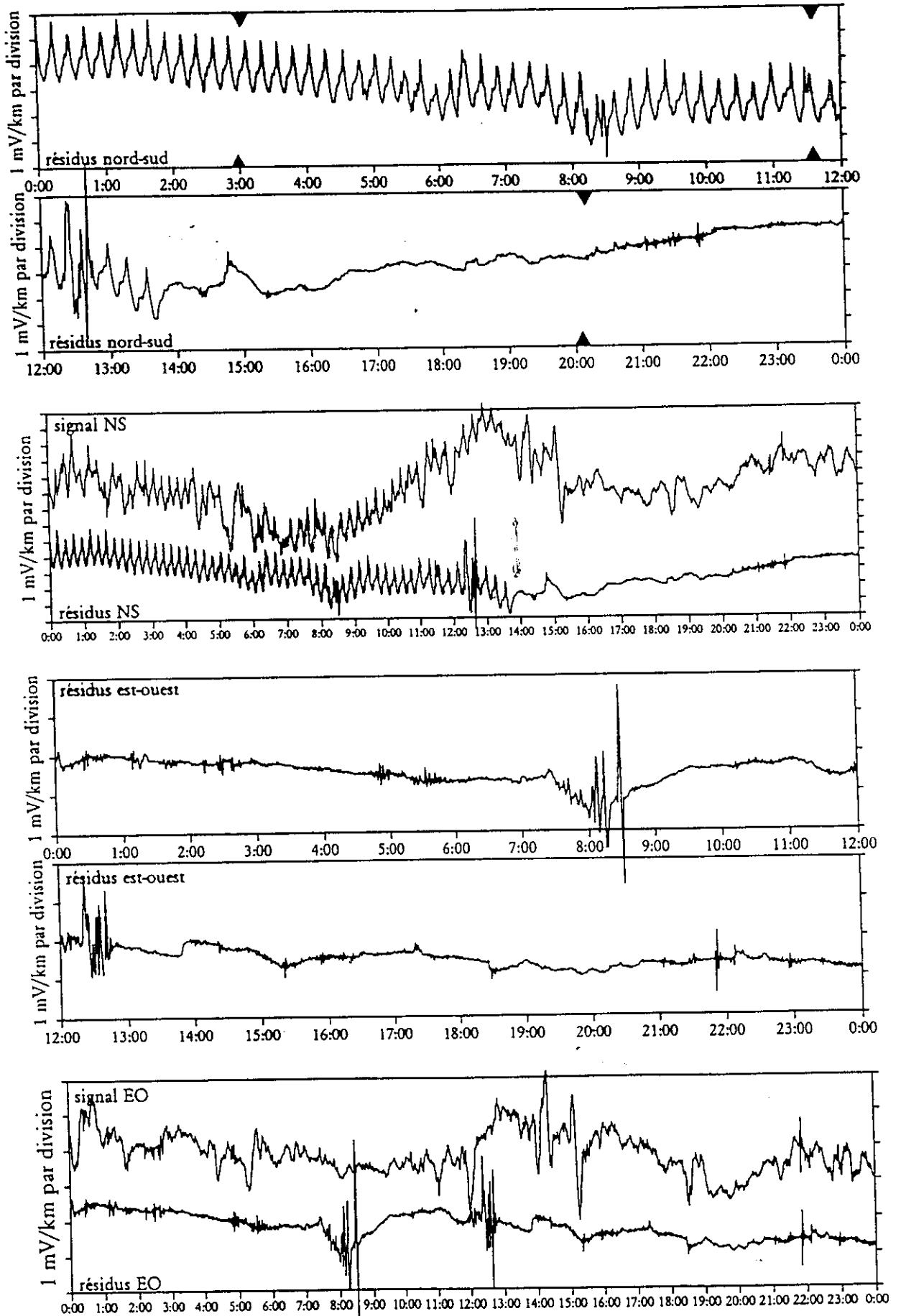
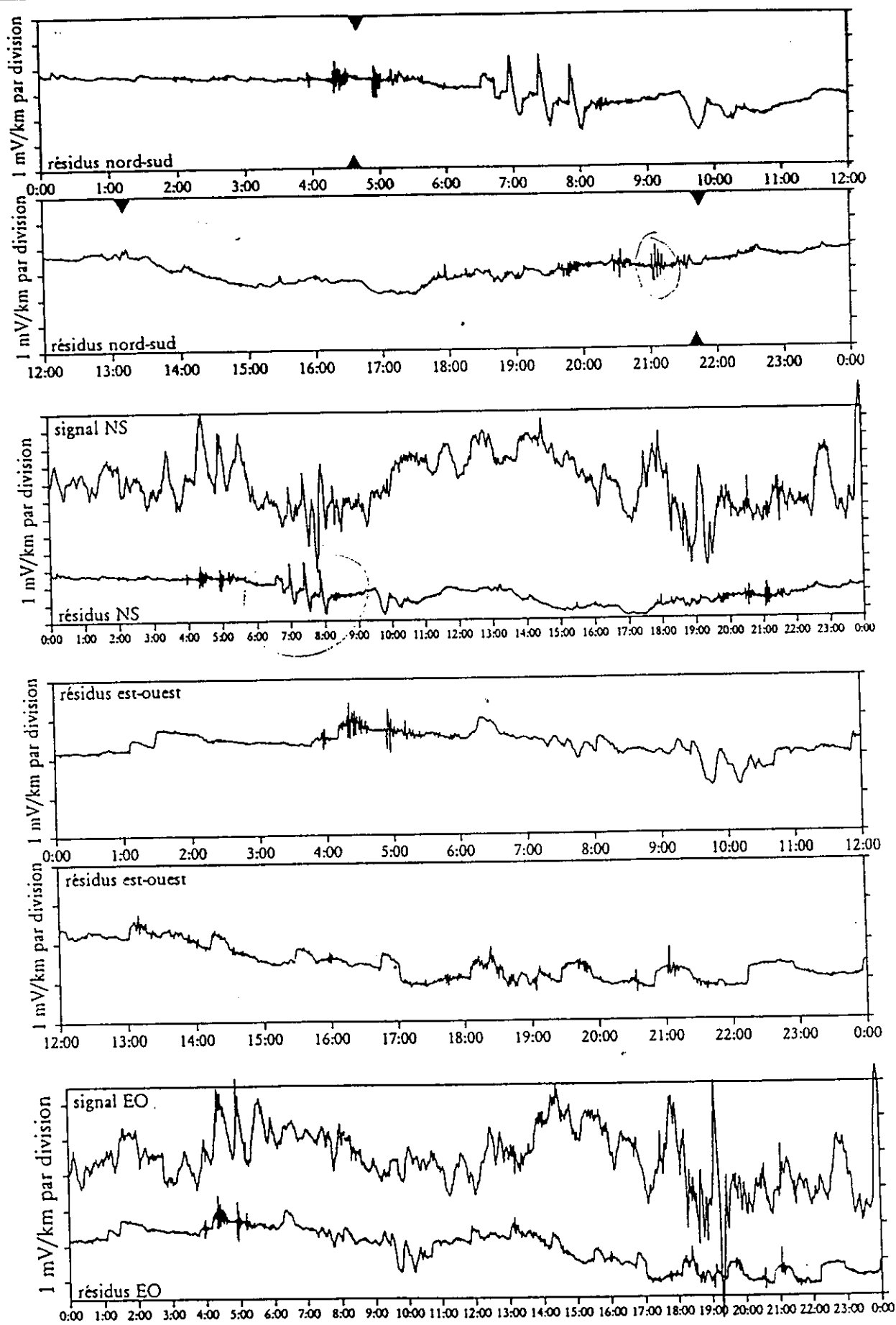


Fig. 5-46: RESIDUS ELECTRIQUES OBTENUS LE 05 AOUT 1995 (JOUR 217, 1995) | GAMME 61440-120 S



◆ Analyse de l'oscillation électrique Nord Sud

→ Cette oscillation (figures 5-32 à 5-47) ne peut être à l'origine de la dégradation des paramètres électromagnétiques calculés et présentés dans le chapitre E.3. En effet, elle est détectée jusqu'au 3 Août 1995 (jour 215, 1995) alors que les perturbations qui affectent la fonction de transfert magnétotellurique se prolongent jusqu'à la fin de Septembre 1995 (la figure 4-7, page 256). D'autre part, la période et l'amplitude de ce signal sont respectivement en dessous de 14 mn et 1,5 mV/km. Elles semblent trop faibles pour être à l'origine de variations de modèle qui sont observées jusqu'à la période de une heure.

→ Avant de tenter de déterminer l'origine de cette oscillation, nous allons nous intéresser plus précisément à ses caractéristiques, en terme de périodicité et d'amplitude. La période maximale observée étant de l'ordre de 15 mn, les signaux électriques résiduels ont d'abord été filtrés par un passe haut de période de coupure $T=2$ heures.

L'analyse de la densité spectrale de puissance permet d'apprécier dans le même temps l'évolution de la période du signal et de son énergie, croissantes toutes deux entre le jour 150 et 215 (résultats figure 5-49, page 311). L'analyse par autocorrélation permet de définir de façon plus précise la période du signal (figure 5-50, page 312).

Les évolutions de la période et de l'amplitude de l'oscillation sont reportées sur la figure 5-48, ci dessous. La période et l'amplitude croissent régulièrement avec le temps, de façon extrêmement régulière en ce qui concerne la période (les estimations de la période sur des plages de 5 jours de données, suivent approximativement une forme du type t^2). L'amplitude, plus difficile à apprécier, suit elle aussi ce comportement, de façon approximative cependant.

Ces caractéristiques très régulières pourraient être dues à un phénomène de battement à une fréquence générée au sein de l'instrumentation (oscillations dues à l'oscillateur ou à l'amplificatrice?) et la fréquence d'échantillonnage. Pour cette raison, nous avons provisoirement exclu cette oscillation du champ de l'étude des signaux électriques résiduels. L'activité tectonique. Il conviendra d'effectuer des tests techniques afin de déterminer si la chaîne d'acquisition peut effectivement être à l'origine de ce phénomène.

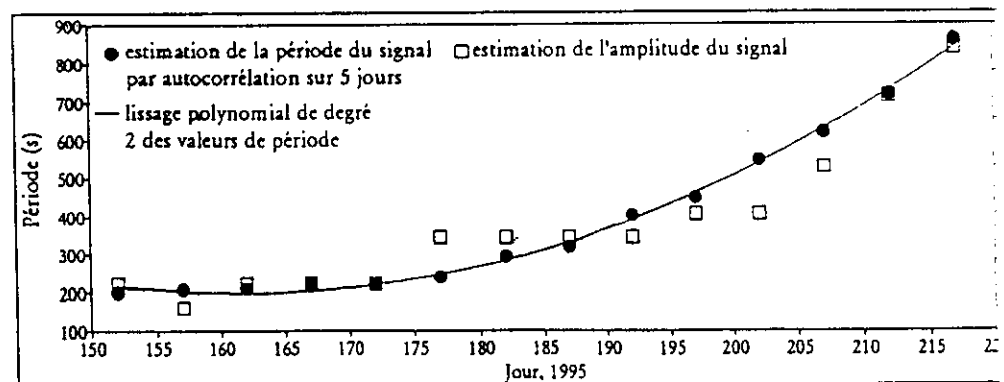
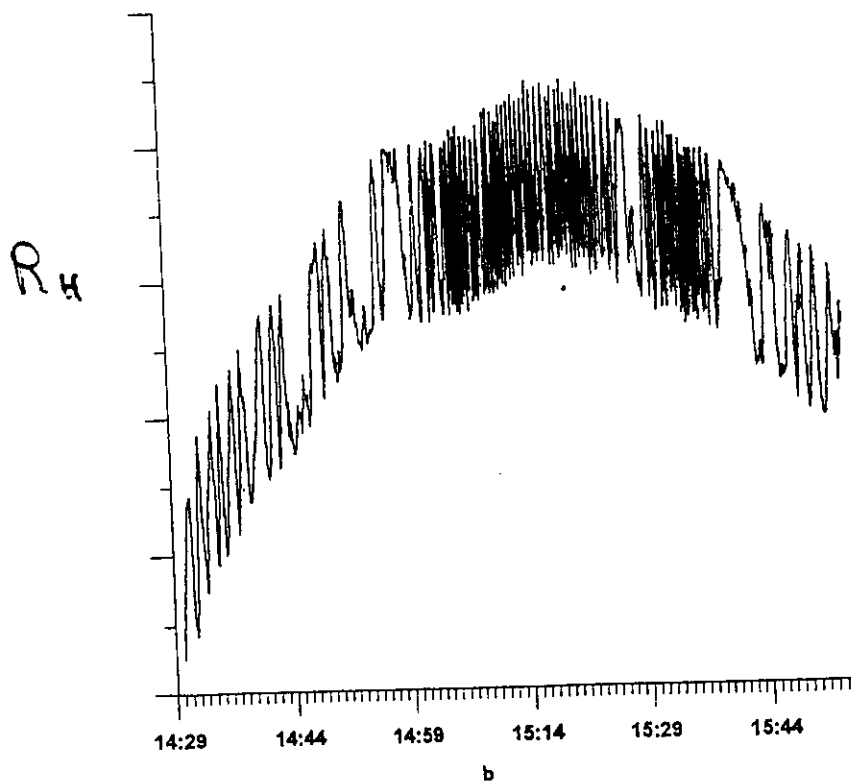
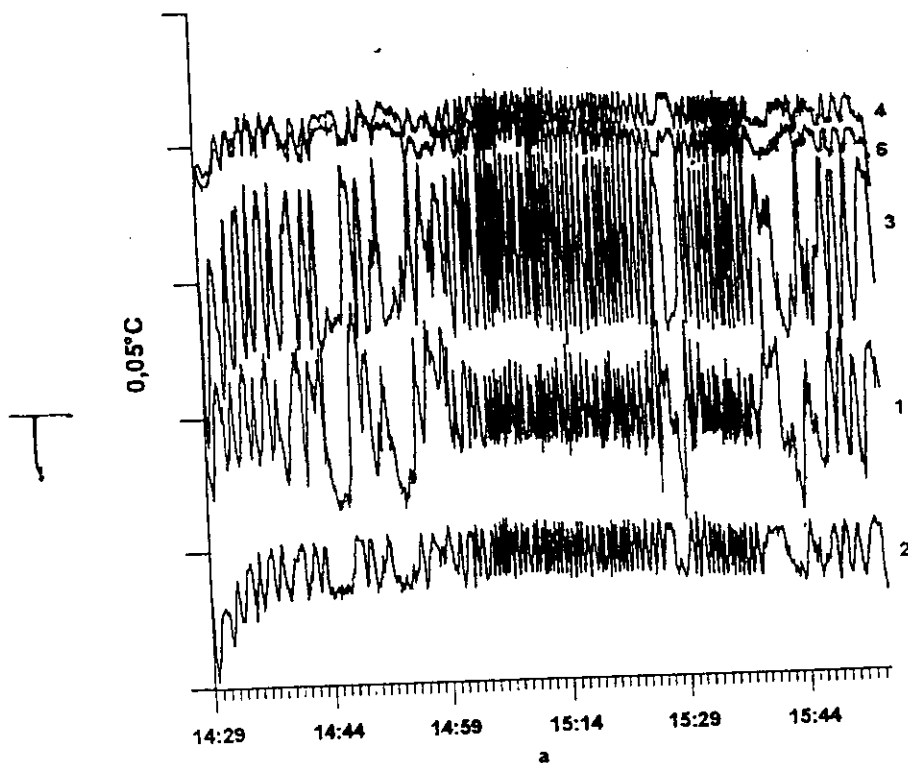


Fig. 5-48: Evolution de la période et de l'amplitude de l'oscillation détectée sur la composante électrique nord sud du jour 150 au jour 215 de l'année 1995 (30 mai-3 Août). Les estimations de la période ont été obtenues par autocorrélation du signal sur des séries de données de 5 jours. L'évolution de cette période est très régulière et peut être approchée par une courbe de degré 2. L'amplitude a été obtenue par une observation directe du signal résiduel.

Periodic oscillations of temperature (top) and relative humidity in the vicinity of pillar 49 of the Meriel quarry.



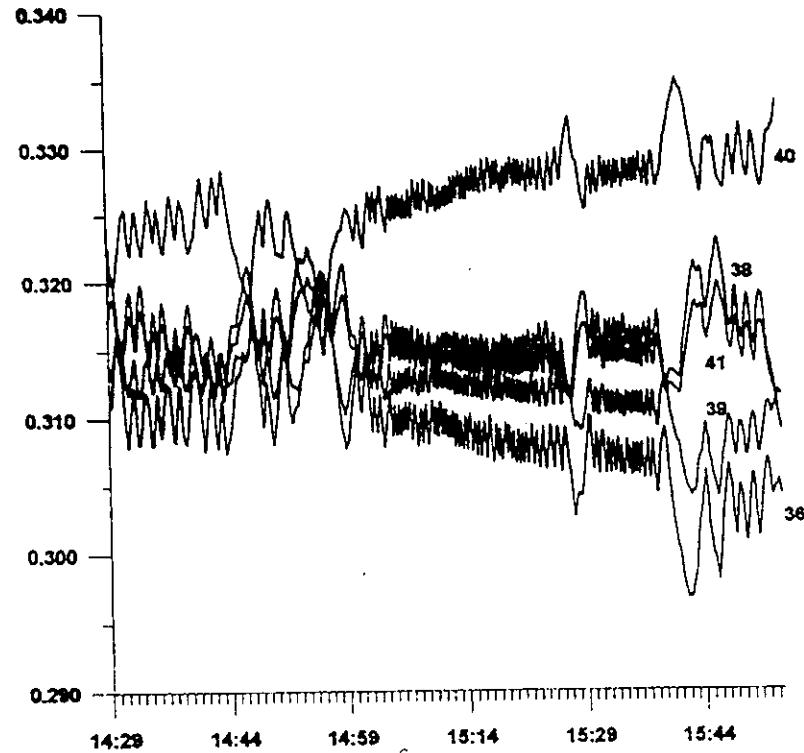
Simultaneous oscillations of the electric potential.

el

Figure 3 Signaux recueillis le 19 mai 1994 de 14 h 29 à 15 h 56.
a) températures en 1, 2, 3, 4, 6 (cf. figure 2), en centièmes de degrés Celsius. b) humidité en RH (cf. figure 2), unités arbitraires. c) différences de potentiel δV_{A_0} ($n = 36, 37, 38, 39, 40, 41$) en volts.

SCIENCE

Signals recorded on 19 May, 1994 from 14 h 29 to 15 h 56.
a) temperatures at points 1, 2, 3, 4, 6 (cf. figure 2); ordinates in hundredths of degrees Celsius.
b) relative humidity at RH (cf. figure 2); arbitrary units.
c) potential differences δV_{A_0} ($n = 36, 37, 38, 39, 40, 41$) in volts.



position de phase; et ces déphasages dépendent de la période de l'oscillation considérée. Le signal apparaît aussi bien entre les deux électrodes profondes (15 cm) du pilier 39, (0) et (1), qu'entre les électrodes 36 à 41 du pilier 40 et l'électrode (0). L'échelle du phénomène est donc au moins de la dizaine de mètres, et il n'intéresse pas seulement la surface de la roche, mais son intérieur – au moins jusqu'à des profondeurs de 15 cm. Quant aux déphasages observés, ils impliquent que les variations du potentiel électrique ne sont pas un effet direct de la température – par quelque effet thermo-chimique –, mais sont la manifestation d'un phénomène dynamique.

Les enregistrements de pression montrent bien des variations de courtes périodes, mais ne présentent pas avec les autres enregistrements de similitude aussi claire que ceux-ci entre eux; cette situation est probablement une conséquence de la sensibilité insuffisante de nos capteurs de pression (l'amplitude des courtes périodes est inférieure à $2 \cdot 10^{-2}$ mbar).

DISCUSSION

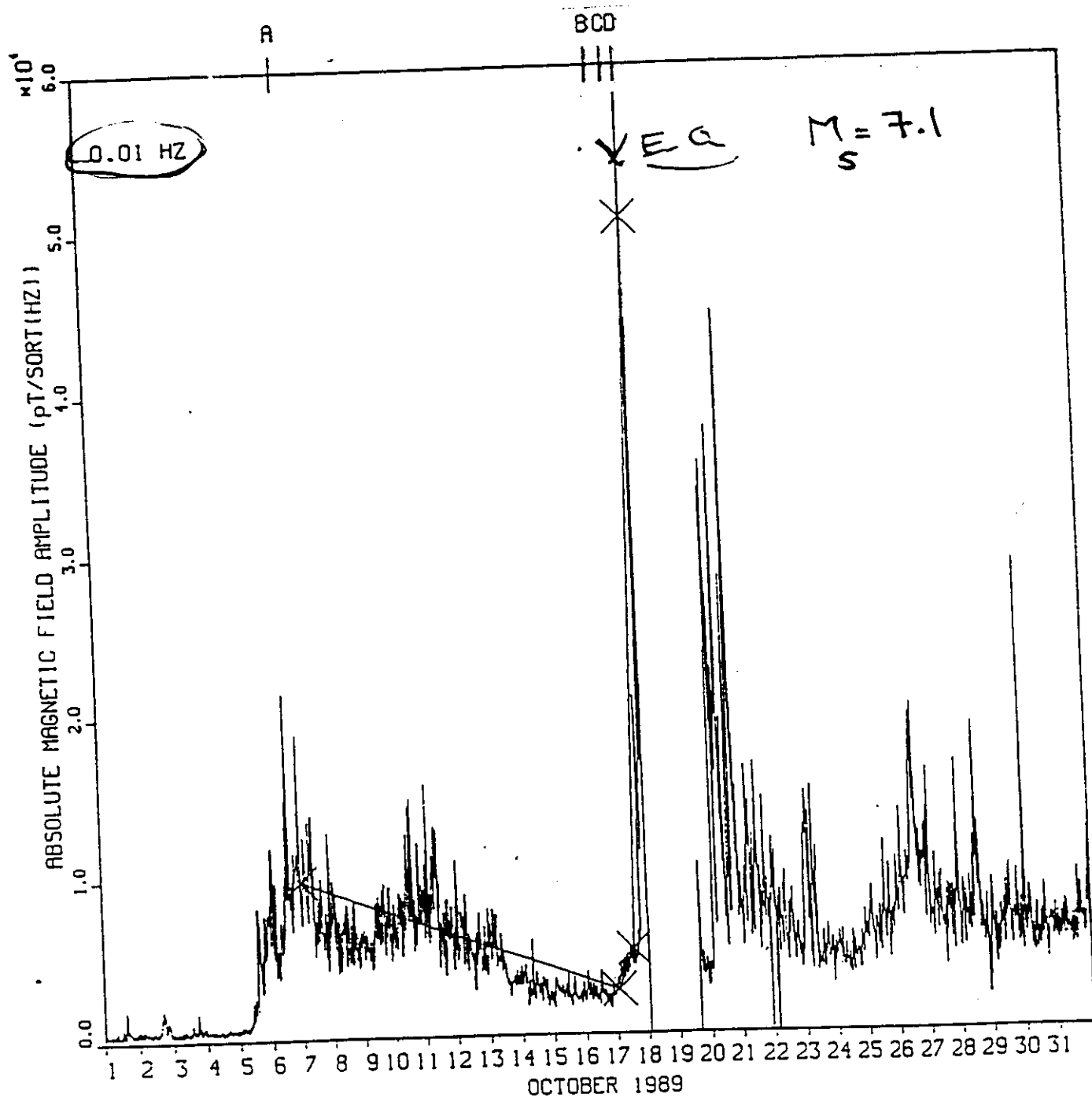
Nous allons maintenant donner une première interprétation de nos résultats.

La température de l'air de la galerie, dans le voisinage des piliers 39 et 40, est remarquablement stable; sa variation annuelle est de l'ordre du degré (2); les échanges avec l'extérieur se font par la porte de la carrière et les cheminées d'aération. Nous avançons (Morat *et al.*, 1992) que cette constance de la température était due aux échanges entre l'air de la galerie et la roche encaissante, très poreuse et largement saturée; en raison du même mécanisme, la variation annuelle de la température dans les parements de la galerie est 50 fois plus faible que dans l'air (2°C dans l'air, $0,05^\circ\text{C}$ à 4 cm de profondeur dans la paroi). Nous pensons donc que les oscillations de la température, de l'humidité, des potentiels électriques observés ici traduisent la réponse du système galerie roche encaissante à une perturbation (probablement thermique). Une élévation – respectivement

Loma Prieta

San Andreas fault

Enhancement of the variance of ULF magnetic signal - around 100 sec - before the Loma Prieta earthquake.



7 km
60 km

ULF 0.01 - 10 Hz
band

(C)

Linear Constant
Amplitude

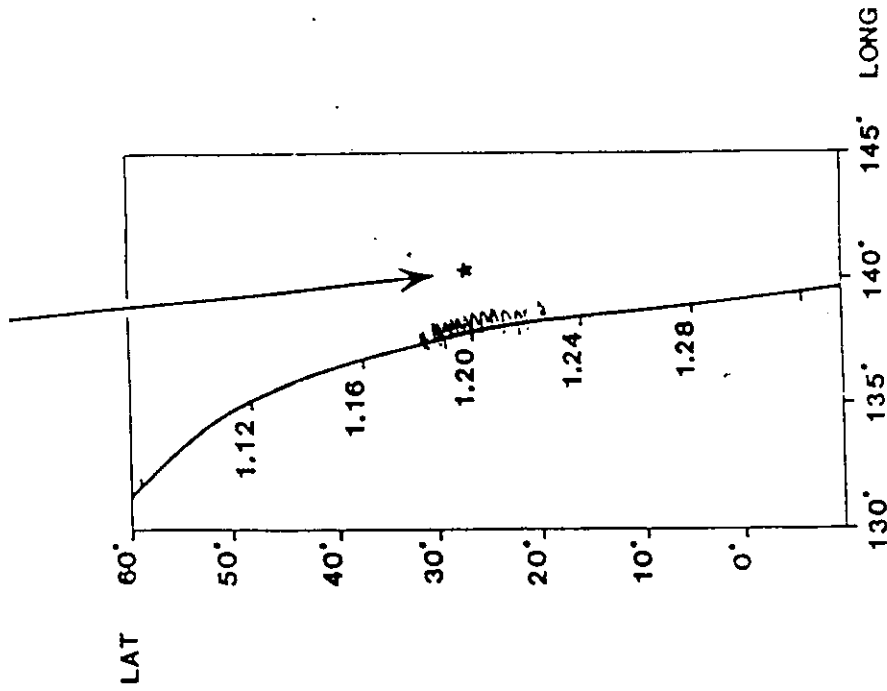
ELF - VLF

band

-10 Hz - 32 kHz

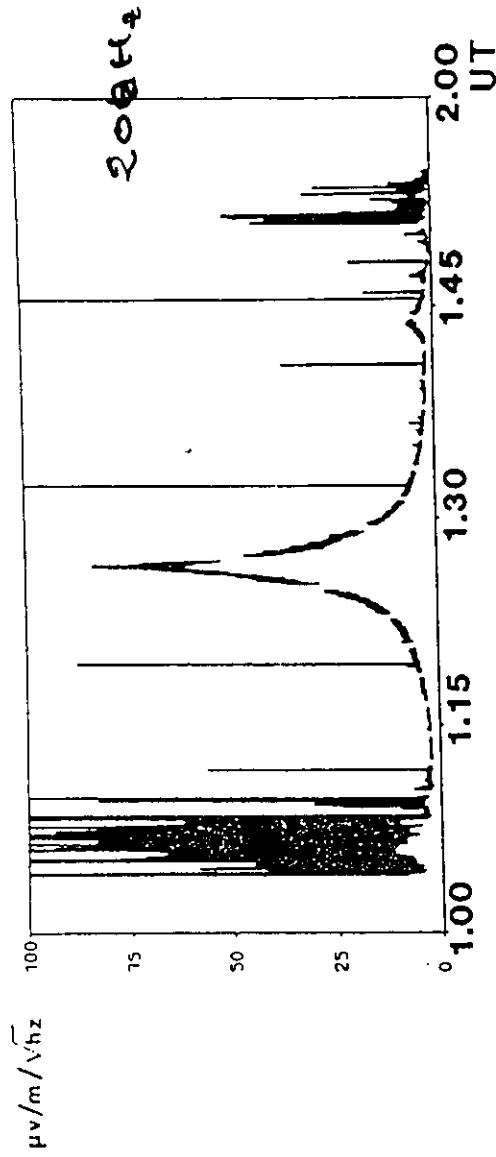


EARTHQUAKE OCCURRED HERE AT 2.37 UT

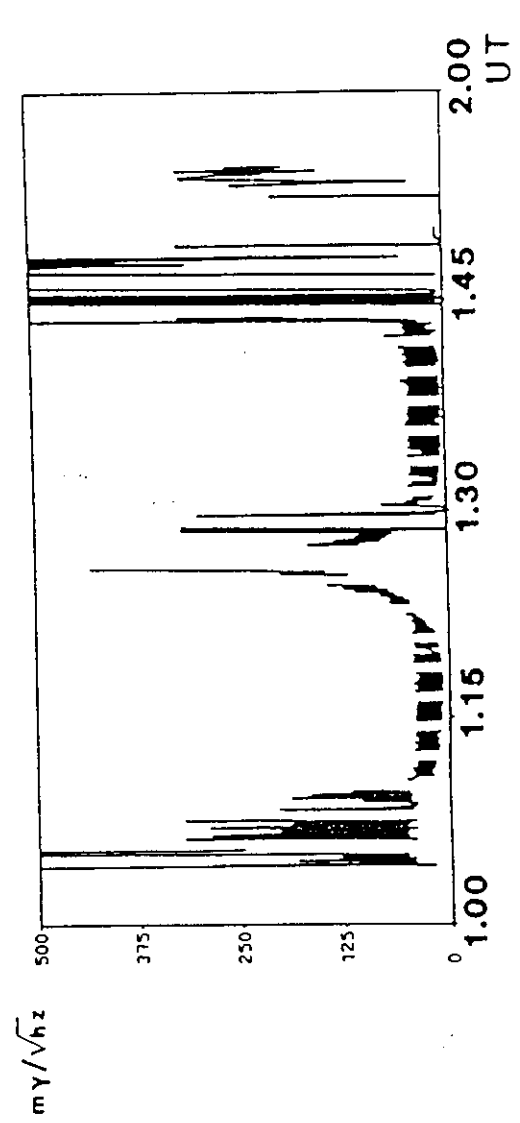


ORBIT TRACK AND UNIVERSAL TIME UT

E FIELD



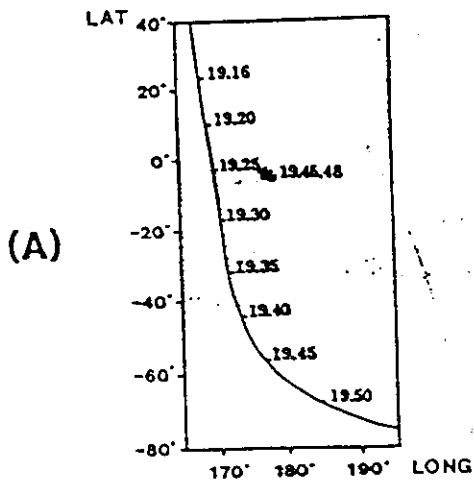
B FIELD



Increase of VLF signal along a satellite track when the satellite gets close to an impending quake. Here the enhancement is observed two hours before the quake.

Another example - Enhancement observed 20 minutes before the quake.

Aureol 3 Satellite



ARCAD-3

17 Mar 1982

M = 5.1

d = 10 km

alt = 1600 km

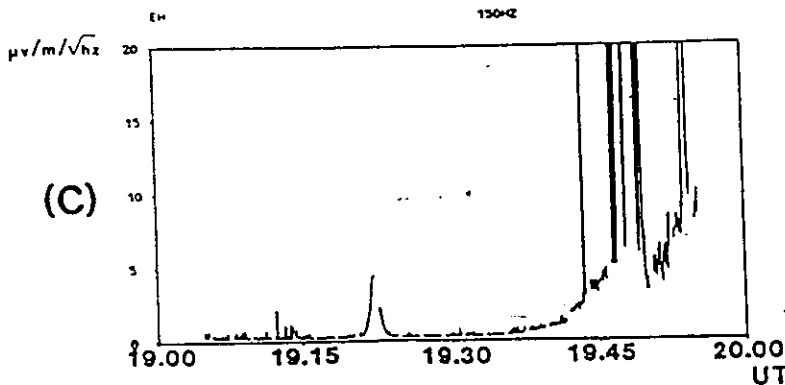
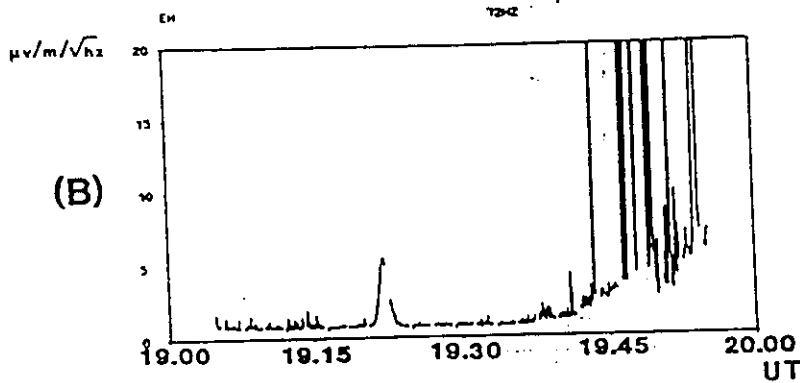
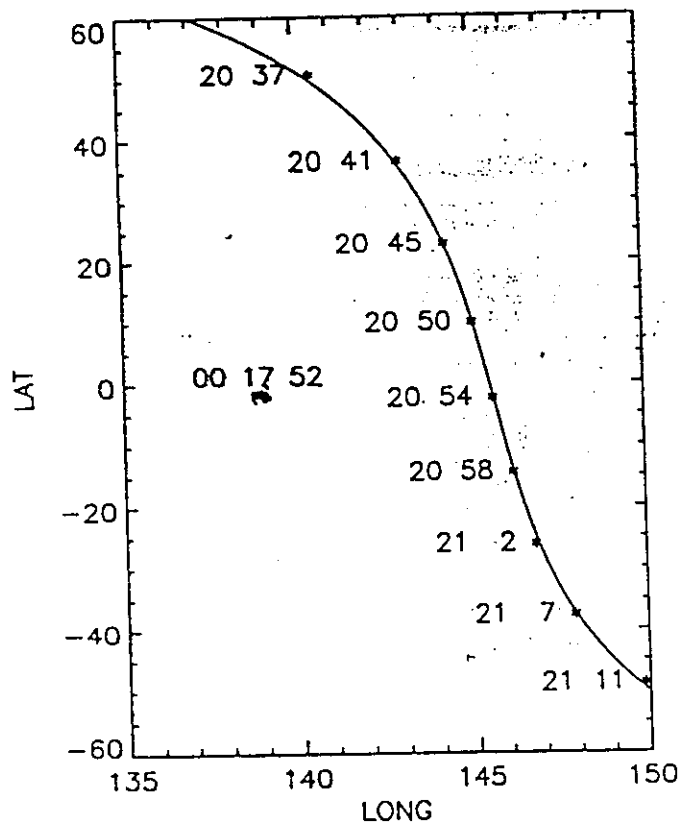


Fig. 1. (A) Orbit of the Aureol-3 satellite between 19.16 and 19.50 UT on 17 March 1982. The star indicates the position of the earthquake. (B) Time variation of the signal recorded by the E_H component in the 72 Hz filter. (C) Time variation of the signal recorded by the E_H component in the 150 Hz filter.

Parrot and Mogilevsky, PEPI, Oct. 89

Another example. Enhancement observed 3 hours after the time of the quake.



19 March 1982

$M = 5.5$

$d = 48 \text{ km}$

