

INSTITUT DES **S**CIENCES ET **T**ECHNOLOGIE.

UNIVERSITE PIERRE ET MARIE CURIE, PARIS 6.

**UNE EVALUATION DE LA METHODE RADAR POUR LA
DESCRIPTION DE STRUCTURES PEU PROFONDES :
APPLICATIONS MINIERES ET HYDROGEOLOGIQUES AU
SENEGAL ET EN TUNISIE.**

RAPPORT DE STAGE DE FIN D'ETUDES D'INGENIEUR EN GEOPHYSIQUE ET GEOTECHNIQUE.

SOMMAIRE

	page
Remerciements.....	3
Introduction.....	4
Chapitre I : Présentation de la méthode radar	
I.1.Introduction.....	6
I.2.Les ondes radar.....	6
I.2.1.Spectre électromagnétique.....	6
I.2.2.Equations de Maxwell.....	7
I.2.3.Ordre de grandeur des vitesses radar.....	10
I.2.4.Atténuation des ondes.....	11
I.2.5.Coefficient de réflexion.....	12
I.3.Principe de la méthode.....	12
I.4.Précédentes études réalisées à l'aide d'un radar géologique.....	14
Chapitre II : Mise en œuvre sur le terrain	
II.1.Description du matériel utilisé.....	16
II.2.Choix des paramètres.....	17
II.3.Réalisation des mesures.....	25
II.4.Conclusion.....	30
Chapitre III : Traitement des données	
III.1.Introduction.....	31
III.2.Présentation du logiciel.....	32
III.2.1.Mise en forme des données.....	32
III.2.2.Gains.....	33
III.2.3.Filtres temporels.....	34
III.2.4.Représentation des traces.....	36
III.3.Applications.....	38
III.4.Remarques et conclusion.....	47
Chapitre IV : Présentation des résultats	
IV.1.Indurations argileuses à la mine de phosphate de Taïba (Sénégal).....	49
IV.1.1.Introduction.....	49
IV.1.2.Géologie.....	49
IV.1.3.Résultats.....	50
IV.1.3.1.Front de taille.....	50
IV.1.3.2.Tranchée de Tobène.....	54
IV.1.3.3.Tranchée de Gade.....	56
IV.1.4.Conclusion.....	57
IV.2.Détection et structures de filons de quartz au Sénégal oriental.....	58
IV.2.1.Introduction.....	58
IV.2.2.Travaux effectués.....	58
IV.2.3.Résultats.....	58
IV.2.3.1.Filons de quartz.....	58
IV.2.3.2.Talus de route.....	62
IV.2.4.Conclusion.....	63
IV.3.Localisation de la nappe phréatique et géométrie de bourrelet de berge dans la vallée du fleuve Sénégal.....	64
IV.3.1.Introduction.....	64

IV.3.2.Résultats.....	66
IV.3.2.1.Parcelle de Donaye.....	66
IV.3.2.2.Cuvette de Pontgari.....	66
IV.3.3.Conclusion.....	68
IV.4.Application pédologique : distinction des terrains dans les premiers mètres, lac collinaire d'El Gouazine, Tunisie.....	69
IV.4.1.Introduction.....	69
IV.4.2.Travaux réalisés.....	70
IV.4.3.Résultats.....	70
IV.4.4.Conclusion.....	71
Conclusion.....	72
Bibliographie.....	73

Je tiens à remercier les personnes sans lesquelles mon stage n'aurait pas pu se dérouler en de si bonnes conditions.

Monsieur ALBOUY, chercheur à l'ORSTOM de Bondy (France), responsable de stage.

Monsieur DESCLOITRES pour avoir proposé un sujet de stage sur le radar avec des applications aussi variées. Je le remercie aussi pour son accueil à l'ORSTOM de Dakar (Sénégal) ainsi que pour sa disponibilité.

Monsieur JOB, chercheur à l'ORSTOM de Tunis (Tunisie).

Monsieur CAMERLYNCK, chercheur à l'université Paris 6, pour son aide à l'interprétation des données.

Messieurs MATHIEU et DALMAYRAC, représentants de l'ORSTOM à Dakar et à Tunis.

Monsieur TABBAGH, Professeur à l'université Paris 6 et directeur de la filière Géophysique-Géotechnique de l'I.S.T.

INTRODUCTION

Ce stage s'est déroulé du 6 mars au 1^{er} septembre 1995, dans le cadre de l'**ORSTOM**, l'Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération.

L'ORSTOM est un établissement public placé sous la tutelle des ministres chargés de la Recherche et de la Coopération.

Depuis cinquante ans, il conduit des recherches sur les milieux intertropicaux. Il propose aussi ses capacités de diagnostic et d'expertise aux organismes publics et privés français, étrangers ou internationaux.

Implanté dans une trentaine de pays en Amérique du Sud, Afrique, Asie et Polynésie, l'ORSTOM emploie 2600 personnes dont 800 originaires des pays du Sud.

Trente-huit unités de recherche sont regroupées dans cinq départements pluridisciplinaires :

- Terre, Océan, Atmosphère ;
- Eaux Continentales ;
- Milieux et Activité Agricole ;
- Santé ;
- Sociétés, Urbanisation, Développement.

La Géophysique fait partie du premier département.

Ce stage a consisté en une évaluation de la méthode radar pour la description de structures peu profondes, avec des applications minières, hydrogéologiques et pédologiques, sur quatre sites choisis au Sénégal et en Tunisie.

Le premier problème a été posé par des indurations argileuses dans du sable, qui gênent l'exploitation de phosphate à ciel ouvert, à la mine de Taïba (Sénégal).

Un second objectif était la reconnaissance des fractures aquifères au Sénégal oriental, ainsi que la détection de filons de quartz et la détermination de la structure de ces filons.

Dans la vallée du fleuve Sénégal, sur un site d'études pédologiques, l'expérimentation avait pour objet la localisation de la nappe phréatique ainsi que la détermination de la géométrie de bourrelet de berge d'un cours d'eau.

Enfin, en Tunisie, sur le site du lac collinaire d'El Gouazine, l'objectif était de distinguer les différentes couches dans les premiers mètres de terrain ainsi que la localisation de la nappe.

Ces problèmes ont été en partie résolus comme nous le verrons en conclusion.

Ce rapport s'articulera en quatre parties.

Tout d'abord, nous présenterons la méthode radar, en définissant les ondes qui la caractérisent, ainsi que le principe de cette méthode. Puis nous discuterons des principales applications du radar actuellement.

Ensuite, nous décrirons la mise en œuvre sur le terrain d'une telle méthode, en présentant le matériel utilisé, les différents essais qui permettent de déterminer les paramètres nécessaires à la réalisation d'un profil ; nous exposerons quelques exemples de difficultés rencontrées.

Puis nous décrirons rapidement le logiciel utilisé pour le traitement des données et nous montrerons l'effet de différents traitements sur un même enregistrement.

Enfin, nous présenterons site par site les résultats obtenus.

CHAPITRE I :

PRESENTATION DE LA METHODE

RADAR

I.1.Introduction.

Méthode géophysique encore assez peu développée en France, le radar l'est beaucoup plus chez nos voisins européens.

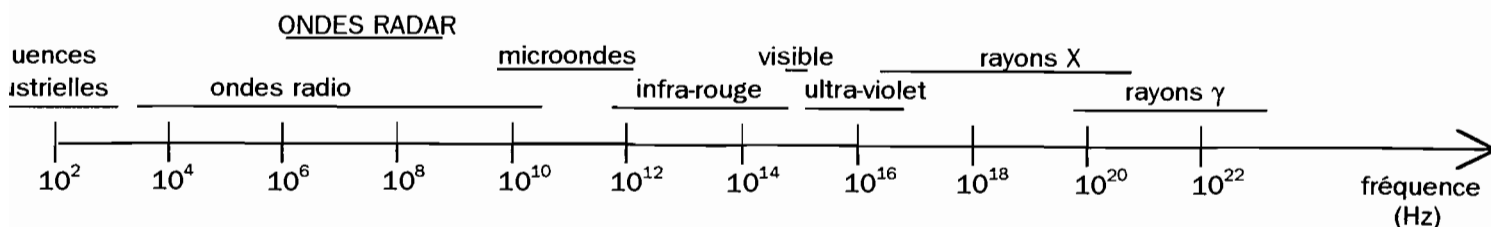
C'est un outil permettant l'investigation des dix à vingt premiers mètres du sous-sol pour les fréquences couramment utilisées : il est possible de repérer certains changements de nature lithologique d'une formation géologique, les fracturations dans un massif, des objets enterrés, des canalisations, grâce à l'analyse de la réflexion des ondes électromagnétiques.

Il complète les études de sub-surface grâce à une bonne résolution des premiers mètres. Les paramètres qui conditionnent la propagation des ondes électromagnétiques sont différents de ceux étudiés par les autres méthodes géophysiques : **le radar met en évidence des contrastes de constante diélectrique.** La propagation des ondes est facilitée lorsque les sols étudiés ont une faible conductivité.

I.2.Les ondes radar.

I.2.1.Spectre électromagnétique.

Le radar utilise les hautes fréquences de quelques MHz à un GHz, dans la gamme des ondes radio. (Hulin, 1971)



1.2.2. Equations de Maxwell.

La propagation d'une onde électromagnétique dans un milieu linéaire, homogène et isotrope est décrite par les équations de Maxwell.

NB : Les quantités vectorielles seront notées en caractères **gras**.

$$\mathbf{rot E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\mathbf{rot H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2)$$

avec **E** : intensité du champ électrique ;
B : densité du flux magnétique ;
H : intensité du champ magnétique ;
J : densité de courant ;
D : déplacement électrique.

soit $\text{div}(\mathbf{rot A}) = 0$, que l'on applique aux équations (1) et (2) :

$$\text{alors } \text{div}(\mathbf{rot E}) = - \text{div} \left(\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \right) = - \frac{\partial}{\partial t} (\text{div } \mathbf{B}) = 0 \quad \text{donc } \text{div } \mathbf{B} = 0 \quad (3)$$

$$\text{et } \text{div}(\mathbf{rot H}) = \text{div } \mathbf{J} + \text{div} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = \text{div } \mathbf{J} + \frac{\partial}{\partial t} (\text{div } \mathbf{D}) = 0.$$

Or la divergence d'un courant est égale au taux d'accumulation de charges

$$\text{donc } \text{div } \mathbf{J} = - \frac{\partial q}{\partial t}.$$

Dans des régions de conductivité limitée, les charges ne s'accumulent pas jusqu'à n'importe quelle quantité pendant le flux de courant donc $\frac{\partial q}{\partial t} = 0$, soit $\text{div } \mathbf{J} = 0$.

$$\text{Donc } \text{div } \mathbf{D} = 0. \quad (4)$$

Dans un milieu linéaire, homogène et isotrope, on a :

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}, \quad \mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad \text{et} \quad \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}, \quad \epsilon \text{ étant complexe et égal à } \epsilon = \epsilon_0 (\epsilon' - i\epsilon'').$$

$$\text{Alors } \text{div } \mathbf{B} = \mu \text{div } \mathbf{H} = 0 \quad \text{donc } \text{div } \mathbf{H} = 0,$$

$$\text{et } \text{div } \mathbf{D} = \epsilon \text{div } \mathbf{E} = 0 \quad \text{donc } \text{div } \mathbf{E} = 0.$$

Les équations de Maxwell s'écrivent alors :

$$(1) \Rightarrow \mathbf{rot E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}$$

$$(2) \Rightarrow \mathbf{rot H} = \sigma \mathbf{E} + \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}.$$

En appliquant le rotationnel à chaque membre des équations, on obtient

$$\mathbf{rot (rot E)} = \mathbf{grad (div E)} - \Delta \mathbf{E}$$

$$= -\mu \frac{\partial}{\partial t} (\mathbf{rot H})$$

$$= -\mu \frac{\partial}{\partial t} \left(\sigma \mathbf{E} + \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right)$$

$$\text{donc } \Delta \mathbf{E} = \mu \sigma \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2}.$$

De même,

$$\mathbf{rot (rot H)} = \mathbf{grad (div H)} - \Delta \mathbf{H}$$

$$= \sigma \mathbf{rot E} + \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} (\mathbf{rot E})$$

$$= \sigma \left(-\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \right) + \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} \left(-\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \right)$$

$$\text{soit } \Delta \mathbf{H} = \mu \sigma \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} + \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2}.$$

Avec des variations temporelles sinusoïdales, les champs deviennent

$$\mathbf{E}(t) = \mathbf{E}_0 e^{i\omega t} \quad \text{et} \quad \mathbf{H}(t) = \mathbf{H}_0 e^{i\omega t}$$

$$\text{soit } \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = i\omega \mathbf{E} \quad \text{et} \quad \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = i\omega \mathbf{H}.$$

$$\text{Alors } \Delta \mathbf{E} = i\omega\mu\sigma\mathbf{E} - \omega^2\varepsilon\mu\mathbf{E} \quad (5)$$

$$\text{et } \Delta \mathbf{H} = i\omega\mu\sigma\mathbf{H} - \omega^2\varepsilon\mu\mathbf{H}. \quad (6)$$

En négligeant les pertes diélectriques ε'' , l'expression de ε se réduit à $\varepsilon_0\varepsilon'$; on néglige de plus les effets magnétiques donc $\mu = \mu_0$.

Il apparaît dans ces équations :

– un terme de courant de conduction : $J_c = \omega\mu_0\sigma$

– un terme de courant de déplacement : $J_d = \omega^2\varepsilon_0\varepsilon'\mu_0$.

Lorsque $\omega\varepsilon_0\varepsilon' \ll \sigma$, c'est-à-dire pour des fréquences assez basses, les courants de déplacement sont négligeables devant les courants de conduction ; (5) et (6) sont des équations de **diffusion**.

Lorsque $\omega\varepsilon_0\varepsilon' \gg \sigma$, c'est-à-dire aux hautes fréquences, les courants de déplacement sont prépondérants ; (5) et (6) sont des équations de **propagation**.

La prospection radar peut concerner le domaine de la propagation mais est également susceptible de faire intervenir le phénomène de diffusion dans les terrains assez conducteurs. C'est pourquoi il est important de se placer à des fréquences suffisamment hautes pour que le phénomène de propagation soit dominant.

C'est le cas lorsque la fréquence d'investigation est supérieure à la valeur f_t , obtenue quand les courants de déplacement et de conduction sont égaux (Annan, 1992).

Soit : $J_c = J_d$

ce qui est équivalent à $\omega\mu\sigma = \omega^2\varepsilon_0\varepsilon'\mu$

$$\text{soit } \omega_t = \frac{\sigma}{\varepsilon_0\varepsilon'}$$

$$\text{Finalement } f_t = \frac{\sigma}{2\pi\varepsilon_0\varepsilon'}$$

1.2.3. Ordre de grandeur des vitesses radar.

La vitesse des ondes radar dans les terrains géologiques est inversement proportionnelle à la constante diélectrique de ces terrains, selon la relation :

$$v = \frac{c}{\sqrt{K}} \quad \text{où } c \text{ est la célérité des ondes dans l'air : } c = 0,3 \text{ m/ns}$$

K la constante diélectrique relative du milieu, $K = \epsilon'$.

La constante diélectrique, la conductivité électrique et la vitesse des ondes radar dans les principaux terrains géologiques sont données dans le tableau suivant (Annan, 1993).

NATURE DU TERRAIN	CONSTANTE DIELECTRIQUE	CONDUCTIVITE ELECTRIQUE (mS/m)	VITESSE DE L'ONDE (m/ns)
Air	1	0	0,30
Eau distillée	80	0,01	0,033
Eau de mer	80	$3 \cdot 10^3$	0,01
Sable sec	3-5	0,01	0,15
Sable saturé	20-30	0,1-1	0,06
Calcaire	4-8	0,5-2	0,12
Granite	4-6	0,01-1	0,13
Argile	5-40	2-1000	0,06
Schistes	5-15	1-100	0,09
Glace	3-4	0,01	0,16

Dans les matériaux géologiques, la présence d'eau est l'un des plus importants facteurs déterminant les propriétés électriques : la constante diélectrique est essentiellement fonction de la teneur en eau. Des lois empiriques ont été données pour l'argile (Collins et al), pour la tourbe (Theimer et al, 1994)...

1.2.4. Atténuation des ondes.

Nous avons calculé au paragraphe 1.2.2. l'expression du laplacien du \mathbf{E} :

$$\Delta \mathbf{E} = (-\omega^2 \epsilon \mu + i \omega \mu \sigma) \mathbf{E}$$

soit $\Delta \mathbf{E} - \gamma^2 \mathbf{E} = 0$ avec $\gamma^2 = -\omega^2 \epsilon \mu + i \omega \mu \sigma$.

ϵ étant complexe, nous le réécrivons sous la forme $\epsilon = \epsilon_0 (\epsilon' - i\epsilon'')$

donc $\gamma^2 = -\omega^2 \mu \epsilon_0 (\epsilon' - i\epsilon'') + i \omega \mu \sigma$

soit $\gamma^2 = -\omega^2 \mu \epsilon_0 \epsilon' + i \omega \mu (\sigma + \omega \epsilon_0 \epsilon'')$.

La tangente de l'angle de perte δ est donc

$$\tan \delta = \frac{\omega \mu (\sigma + \omega \epsilon_0 \epsilon'')}{\omega^2 \mu \epsilon_0 \epsilon'} \quad \text{soit} \quad \tan \delta = \frac{\sigma + \omega \epsilon_0 \epsilon''}{\omega \epsilon_0 \epsilon'}$$

En écrivant $\gamma = \gamma' + i\gamma''$ (Goodman, 1994), la partie réelle est

$$\gamma' = \omega \left(\frac{1}{2} \mu \epsilon_0 \epsilon' [(1 + \tan^2 \delta)^2 - 1] \right)^{1/2}$$

et la partie imaginaire

$$\gamma'' = \omega \left(\frac{1}{2} \mu \epsilon_0 \epsilon' [(1 + \tan^2 \delta)^2 + 1] \right)^{1/2}$$

Pour $\tan \delta \ll 1$, γ' et γ'' se simplifient et on obtient :

$$\gamma' = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon'} \tan \delta \quad \text{et} \quad \gamma'' = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon'} \quad \text{où } c \text{ est la vitesse des ondes dans l'air.}$$

La profondeur de pénétration est définie par $p = 2/\gamma'$ et l'atténuation des ondes est

$$\alpha = 8,68/p \quad (\text{Camerlynck et al., 1994}),$$

$$\text{donc } \alpha = \frac{8,68 \omega \sqrt{\epsilon'} \sigma + \omega \epsilon_0 \epsilon''}{2 c \omega \epsilon_0 \epsilon'}$$

$$\text{finalement } \alpha = 1,64 \frac{\sigma + 1000 \omega \epsilon_0 \epsilon''}{\sqrt{\epsilon'}} \quad \text{avec } \alpha \text{ en dB/m, } \sigma \text{ en mS/m.}$$

L'atténuation est donc proportionnelle à la conductivité du sol.

1.2.5. Coefficient de réflexion.

Le coefficient de réflexion, pour des incidences proches de la normale, est défini par :

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$$

avec Z impédance électromagnétique complexe :

$$Z = \sqrt{\frac{i\omega\mu}{\sigma + i\omega\epsilon'}} \quad \text{où } \epsilon' \text{ est la partie réelle de la permittivité diélectrique.}$$

Dans les conditions de propagation, $\sigma \ll \omega \epsilon'$ donc

$$Z = \sqrt{\frac{i\omega\mu}{i\omega\epsilon'}} \quad \text{soit } Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon'}}.$$

$$\text{Alors } R = \frac{\frac{1}{\sqrt{\epsilon'_2}} - \frac{1}{\sqrt{\epsilon'_1}}}{\frac{1}{\sqrt{\epsilon'_2}} + \frac{1}{\sqrt{\epsilon'_1}}}$$

$$\text{soit finalement } R = \frac{\sqrt{\epsilon'_1} - \sqrt{\epsilon'_2}}{\sqrt{\epsilon'_1} + \sqrt{\epsilon'_2}}$$

Le coefficient de réflexion est donc défini par le contraste de permittivités relatives des deux terrains.

1.3. Principe de la méthode.

Le radar géologique utilise la réflexion d'ondes électromagnétiques pour l'exploration des couches superficielles du sous-sol. La méthode radar, mise à part sa profondeur d'investigation, est relativement similaire à la sismique réflexion.

Une antenne émettrice envoie dans le sous-sol des impulsions d'énergie électromagnétique de très brève durée : la longueur du pulse émis est proportionnelle à la fréquence d'émission.

Quand les ondes produites rencontrent un contact entre deux matériaux de composition différente, une partie de leur énergie est réfléchi vers le haut s'il y a un contraste des constantes diélectriques. L'autre partie des ondes émises continue à s'enfoncer. Les ondes réfléchies sont captées par une antenne réceptrice, amplifiées et transmises à un système d'enregistrement graphique.

L'émission se fait par un dipôle. Elle n'est pas ponctuelle, du fait du diagramme d'émission des antennes en forme de lobes. L'ouverture des lobes dépend de la nature du terrain : plus la constante diélectrique est petite, plus les lobes sont ouverts donc l'énergie émise par unité de surface diminue. Par conséquent, l'émission touche une faible profondeur de terrain lorsque la constante diélectrique est petite.

Afin d'obtenir le meilleur recouvrement des lobes d'antennes, il faut séparer les antennes d'un offset optimal qui dépend donc de la nature du terrain.

L'enregistrement produit un radargramme sur lequel l'abscisse correspond aux distances le long du parcours des antennes et l'ordonnée au temps aller-retour employé par les ondes pour atteindre les objectifs et revenir. Le temps est compté en nanosecondes car les ondes radar se propagent à des vitesses voisines de celle de la lumière.

La connaissance de la vitesse des ondes dans le terrain est nécessaire pour la conversion des temps en profondeurs et la migration. Elle permet d'obtenir une image en coupe verticale du sous-sol à partir d'un radargramme.

I.4. Précédentes études réalisées à l'aide d'un radar géologique.

Depuis une dizaine d'années, le radar était utilisé pour des applications géotechniques, où l'investigation est limitée aux premiers mètres de profondeur. Il permet de détecter des cavités (Holub et Dumitrescu, 1994), de localiser des zones karstiques à faible profondeur après des travaux de terrassements (Robert et de Bosset, 1994), de visualiser les armatures d'acier dans du béton armé (Astier, 1990).

Le développement récent d'antennes de basses fréquences a élargi le champ d'application du radar à des profondeurs de plusieurs dizaines de mètres. La méthode a alors pu être appliquée à la géologie, d'où l'appellation de géoradar que l'on rencontre parfois (Davis et Annan, 1989 ; Sigurdsson, 1994).

Cependant, les domaines d'application du radar sont variés : la méthode a été utilisée avec succès pour cartographier des épaisseurs de glace (Dallimore et Davis, 1992), la profondeur du socle ou la stratigraphie d'un sol. De même, cette méthode est très utile pour la détection des fracturations dans des massifs rocheux (Holloway, 1992).

Le radar est aussi utilisé en hydrogéologie pour la détection du niveau de la nappe phréatique (van Overmeeren, 1994), la mesure de la profondeur de l'eau des lacs ou le suivi de polluants (Redman et Annan, 1992); c'est également **une méthode non-destructive** très bien adaptée à la recherche de vestiges archéologiques (Goodman, 1994).

De nombreuses expérimentations ont eu lieu au Canada, aux Etats-Unis ainsi qu'en Europe. Mais, à notre connaissance, aucune n'a été réalisée en Afrique subsaharienne avant celle-ci.

CHAPITRE II :
MISE EN ŒUVRE SUR LE TERRAIN

II.1. Description du matériel utilisé.

Le radar qui a été utilisé durant ce stage est un pulseEKKO 100, de la société Sensors & Software (Mississauga, Canada).

C'est un radar de type pulsé qui est composé d'une console, de deux antennes et nécessite un ordinateur portable. Le logiciel d'acquisition est propre au matériel de la société Sensors & Software.

Les unités d'émission et de réception sont composées chacune d'une antenne sur laquelle un boîtier électronique est clipé ; il est amovible.

Les photos de la page suivante montrent l'ensemble de l'appareil.

Nous avons travaillé avec deux paires d'antennes, de 100 et 200 MHz. La bande passante de l'ensemble du système d'acquisition est de l'ordre de la fréquence centrale : la bande passante s'étend de 50 à 150 MHz pour les antennes de fréquence centrale 100 MHz.

La console radar est asservie à l'ordinateur : l'utilisateur déclenche l'acquisition sur l'ordinateur. La console, reliée aux boîtiers des antennes par des fibres optiques, transmet alors l'ordre à l'émetteur sous la forme d'un signal lumineux. L'électronique de l'émetteur reçoit ce signal et provoque l'émission d'une onde électromagnétique. L'impulsion d'émission a une durée égale à l'inverse de la fréquence centrale des antennes : 5 ns pour 200 MHz, 10 ns pour 100 MHz.

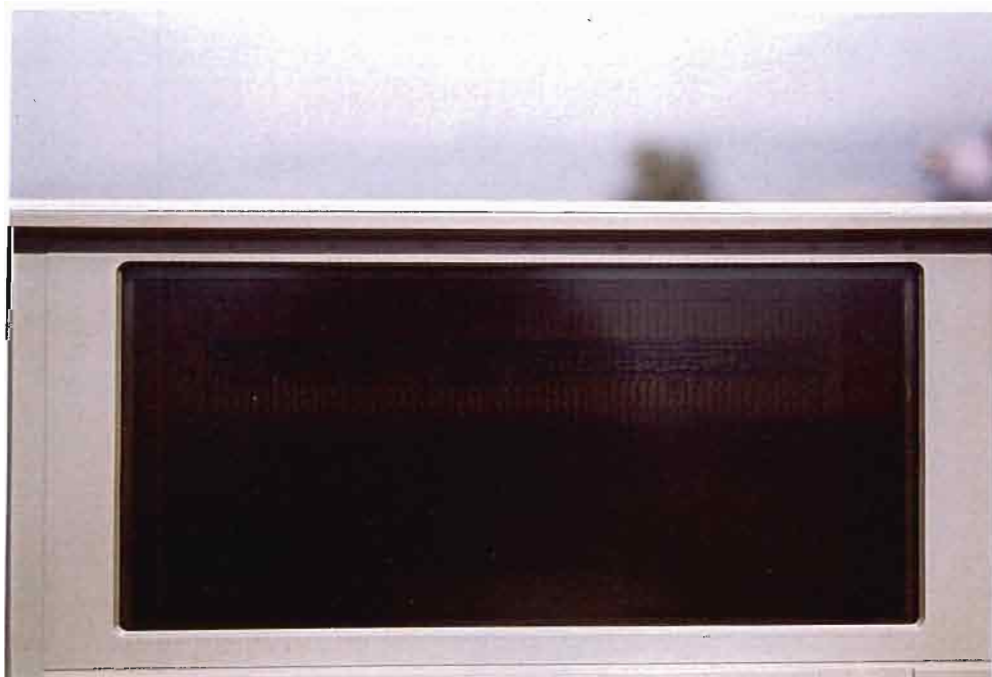
Lorsque l'onde émise rencontre un changement de terrain constituant un contraste de constante diélectrique, une partie de son énergie se réfléchit sur l'interface. L'onde réfléchie est enregistrée à la surface par l'antenne réceptrice. L'information



Antennes.



Ordinateur et console.



Ecran pendant l'acquisition.

est convertie par l'électronique du récepteur et transmise à la console sous forme de signal lumineux. La console transmet le message à l'ordinateur, et la trace enregistrée se dessine à l'écran en aire variable ou en couleurs.

II.2. Choix des paramètres.

Lorsque l'utilisateur arrive sur le terrain, il doit définir un certain nombre de paramètres.

Field Line	Start Position : 1.50000	Step Size : 0.200
	Operating Mode : Step	Move Delay : 0.000 sec
	Starting Delay : 0.000 sec	Pause Trace: 0
	Surveying Mode : Reflection	Antenna Sep: 1.200
	Title1: profil sur la parcelle de Donaye	
	Title2:	
ns	Const: 500.000	
	Ant. Frequency: 200.000 MHz	Pulser Voltage: 400 V
	Distance Units: metres	Job Number :
out	Baud : 9600	Serial : COMM1
	Graph: 50	Screen: Color
		Trace : Wiggle
ions	Depth Axis: ON	Shading: RIGHT
		Velocity: 0.150 m/ns
tem	Time Window: 500 ns	Sampling Int: 800 ps
	No. Stacks : 32	Zero Adjust : 10 ns
efaults	Exit	Field Line
yout	Options	Run
		Gains
		System
		Job
		Velocity

Sensors & Software ===== pulseEKKO 100 RUN ===== V 4.0 ==

Paramètres à rentrer avant de commencer l'acquisition.

Il faut donc déterminer la fréquence des antennes à utiliser, la distance de séparation ainsi que l'orientation des antennes. Puis il faut estimer la vitesse et les conditions de propagation de l'onde dans le terrain.

Ensuite, la longueur d'enregistrement et le nombre d'acquisition à chaque station sont sélectionnés. Enfin, le profil est tracé de manière à recouper les structures intéressantes et le pas de mesure est choisi.

Le choix de la fréquence des antennes se base essentiellement sur la profondeur et la taille de l'objectif ainsi que sur la taille des hétérogénéités : sur l'enregistrement, il faut qu'on puisse distinguer la cible de l'environnement.

En fait, plus la fréquence d'émission est basse, plus la résolution du radargramme dans les premiers mètres de profondeur est médiocre et plus la profondeur de pénétration des ondes est grande, si la conductivité du terrain est suffisamment basse pour engendrer une faible atténuation.

Le pouvoir de séparation est fonction de la fréquence des antennes et de la nature du sol.

Le critère de séparation est basé sur le fait suivant : il faut que la différence de temps correspondant à la réflexion sur deux objets à distinguer soit supérieure à la moitié de la largeur du pulse.

Soit δz la distance entre les deux objets.

Le temps qui sépare les deux réflexions est : $\delta t = 2\delta z/v$.

Le critère est donc : $\delta t > 1/2F$ où F est la fréquence centrale des antennes.

Soit $2\delta z/v > 1/2F$

$$\delta z > v/4F$$

Or $\lambda = v/F$

donc $\delta z > \lambda/4$.

Pour $F = 100$ MHz et $K = 9$, $\lambda = 3 \cdot 10^8 / (10^8 \cdot \sqrt{9})$ $\lambda = 1$ m donc $\delta z = 25$ cm.

Pour $F = 100$ MHz et $K = 20$, $\lambda = 67$ cm donc $\delta z = 16,7$ cm.

Pour $F = 200$ MHz et $K = 9$, $\lambda = 50$ cm donc $\delta z = 12,5$ cm.

Le pouvoir de séparation augmente donc avec la fréquence des antennes et la constante diélectrique.

Pour étudier des niveaux profonds, des antennes de basses fréquences sont donc préférables. Par contre, pour atteindre un objectif peu profond, il est possible de choisir des antennes de hautes fréquences afin d'améliorer la résolution de l'enregistrement, à condition toutefois que la profondeur d'investigation soit suffisante pour atteindre l'objet voulu : une bonne résolution est inutile si la cible n'est pas touchée...

Il faut donc arriver à un compromis entre une bonne résolution et une profondeur de d'investigation adaptée. Cependant, si l'utilisateur a un choix restreint de fréquences d'antennes, il se peut que les antennes ne soient pas parfaitement adaptées aux objectifs.

Trois types d'essais permettent de déterminer les autres paramètres.

L'essai de **séparation des antennes** a pour but d'éliminer le couplage d'antennes (ou *system ringing*) qui provoque des artefacts de mesure apparaissant sous la forme de pseudo-réfecteurs horizontaux, susceptibles de masquer l'information intéressante.

Pour réaliser cet essai, il faut positionner les antennes sur le profil choisi, en les écartant de la distance minimale préconisée – la longueur des antennes, pour ce type d'appareil – puis acquérir une dizaine de traces sans déplacer les antennes. Ensuite, il faut augmenter la séparation des antennes d'un pas choisi et poursuivre l'acquisition. En recommençant cette opération suffisamment, l'utilisateur peut comparer les traces obtenues ; la séparation est satisfaisante lorsque le signal n'est plus perturbé par le couplage d'antennes.

Séparation des

antennes : 0,5 m 0,7 m 0,9 m 1,1 m 1,2 m

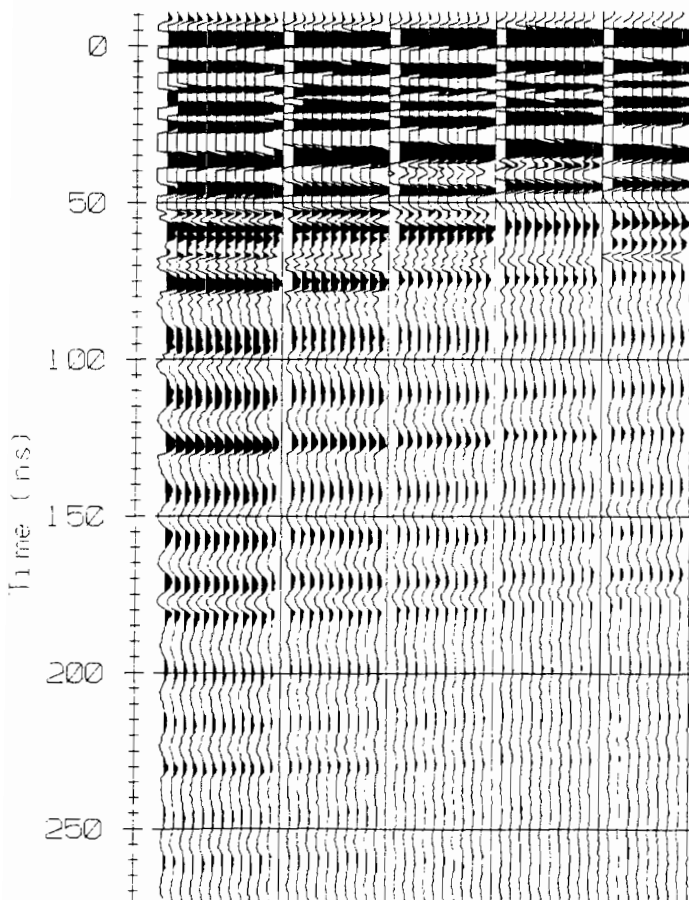


figure 1.

La figure 1 présente l'enregistrement d'un essai de séparation des antennes.

Le profil a ensuite été réalisé avec un écartement de 1,20m entre les antennes.

Cependant, la résolution en profondeur décroît lorsque la séparation des antennes augmente. Il s'agit donc de trouver un compromis entre couplage d'antennes et résolution ainsi qu'entre couplage d'antennes et recouvrement des lobes d'émission. D'autre part, la profondeur de l'objectif varie d'un site à l'autre donc cet essai est à réaliser sur chaque site pour déterminer l'écartement d'antennes optimal.

Afin d'évaluer la vitesse des ondes dans le terrain, un **Common Mid Point** (CMP) doit être réalisé.

L'essai se fait en séparant les antennes d'un pas constant à partir d'un point milieu commun.



Il est préférable que le CMP soit réalisé dans un terrain latéralement homogène, afin de mesurer la vitesse moyenne de l'onde dans un seul terrain et de faciliter l'interprétation des mesures.

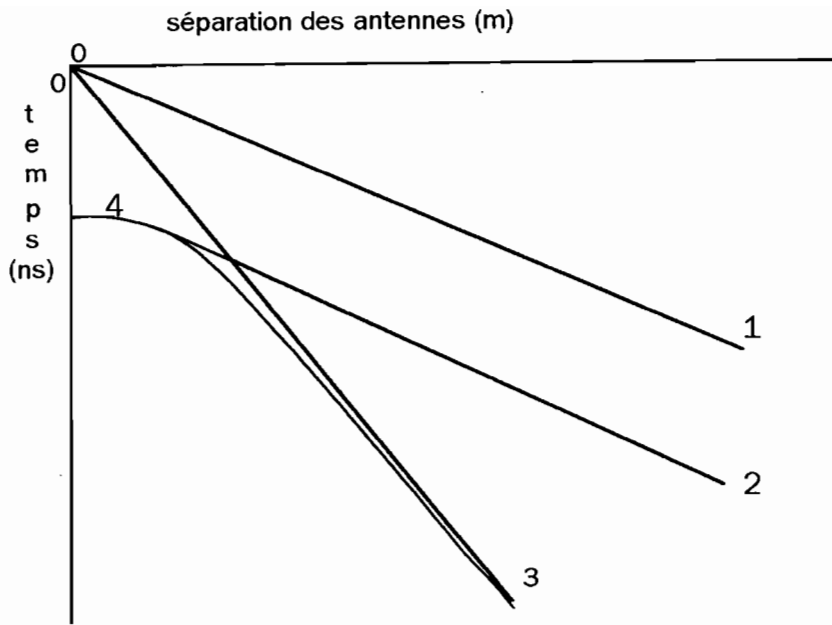
Cet essai est à faire systématiquement dans tous les terrains rencontrés si la vitesse des ondes n'y est pas parfaitement connue ; effectivement, c'est le seul moyen dont dispose l'utilisateur pour convertir les temps en profondeurs avec seulement un radar. Il est possible de mesurer la constante diélectrique in situ grâce au carottage de sols ou par l'utilisation du TDR (*Time Domain Reflectometry*), en complément de la méthode radar.

Le principe du TDR est un peu le même que le radar : il mesure des temps de trajet d'ondes électromagnétiques dans le sol.

Deux tiges métalliques enfoncées dans le sol jouent le rôle de guide d'onde pour la propagation d'une impulsion électromagnétique émise par un câble émetteur. Lorsque l'impulsion rencontre une discontinuité, telle que la fin du guide d'onde, une partie de l'énergie est réfléchie vers l'appareil de contrôle. La constante diélectrique du sol impose le temps de trajet de l'onde. Le principal facteur influençant la constante diélectrique d'un sol est sa teneur en eau.

Cet appareil permet de déterminer la vitesse de l'onde électromagnétique donc la constante diélectrique du terrain (Nielsen *et al.*, 1995).

Les figures suivantes montrent la représentation théorique d'un CMP ainsi que le trajet des ondes que le récepteur enregistre.



Modèle d'interprétation des CMP.

- 1. onde directe dans l'air.
- 2. onde critique réfractée.
- 3. onde directe dans le sol.
- 4. onde réfléchie.

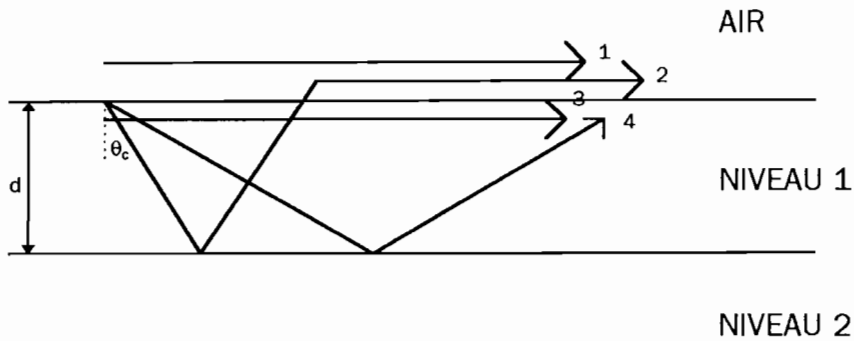
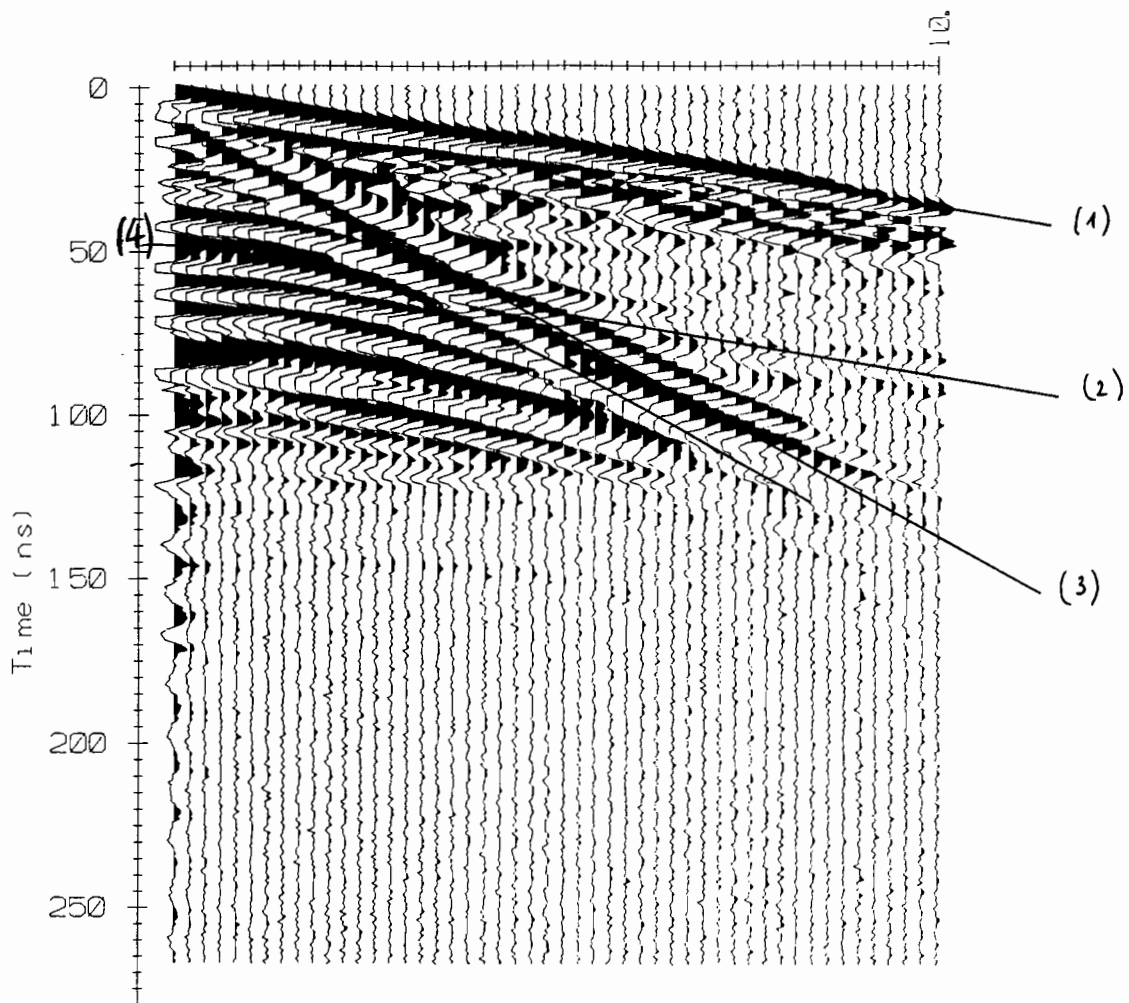


Schéma de la propagation des ondes.

Un enregistrement se présente sous la forme suivante :



La droite (1) représente l'onde directe dans l'air ; son équation est :

$$t = \frac{x}{c} \quad \text{où } c : \text{ célérité de l'onde dans l'air ; } c=0,3 \text{ m/ns.}$$

La droite (2) représente l'onde critique réfractée, d'équation :

$$t = \frac{x}{c} + \frac{2h}{\cos \theta_c} \left(\frac{1}{v} - \frac{1}{c} \sin \theta_c \right)$$

La droite (3) représente l'onde directe dans le sol ; son équation est :

$$t = \frac{x}{v} \quad \text{où } v : \text{ vitesse de l'onde dans le sol, exprimée en m/ns.}$$

L'hyperbole (4) représente l'onde réfléchie ; son équation est :

$$t = \frac{(x^2 + 4d^2)^{1/2}}{v} \quad \text{où } d \text{ est la profondeur du premier réflecteur.}$$

Les vitesses de l'onde sont obtenues en mesurant la pente de ces droites sur un enregistrement.

Un autre type de mesures pour déterminer la vitesse dans une roche est la "**transillumination**". Il s'agit de déplacer les antennes de part et d'autre d'un affleurement. Cet essai est réalisable lorsque l'affleurement se présente sous la forme d'un piton ou lorsqu'une tranchée permet d'accéder à un filon qui affleure en surface par exemple. Le principe de l'interprétation de la mesure est alors le même que pour un CMP. Les ondes se propagent selon une trajectoire directe et il est alors possible de mesurer la vitesse moyenne de l'onde dans la roche.

Nous nous sommes intéressés aux effets de séparation des antennes, au CMP et à la transillumination, en laissant de côté les problèmes d'orientation d'antennes qui peuvent donner lieu à de nombreux essais. L'orientation utilisée pour la réalisation de tous les enregistrements est l'orientation standard conseillée par le manuel d'utilisation, à savoir les deux antennes parallèles entre elles et perpendiculaires au profil.

Lorsque les antennes sont choisies et que la vitesse des ondes est estimée, il faut déterminer la longueur de l'enregistrement : l'utilisateur choisit la fenêtre d'enregistrement. Il donne le temps ou la profondeur d'enregistrement voulus en fonction de la profondeur de l'objet à atteindre.

Il faut aussi sélectionner le nombre d'acquisitions à chaque station, appelé *stack*. Celui-ci dépend du bruit ambiant : lorsque les antennes de 100 MHz sont utilisées, leur bande passante allant de 50 à 150 MHz, les ondes radio FM peuvent être enregistrées. Pour améliorer le rapport signal/bruit, il faut augmenter le nombre d'acquisition à chaque position de mesure : le bruit étant aléatoire, il n'est pas en

phase, contrairement au signal qui est identique d'une acquisition à l'autre. La sommation des acquisitions donne donc un enregistrement où le signal est plus élevé parce que les amplitudes sont additionnées tandis que le bruit garde à peu près la même amplitude, du fait de sa nature aléatoire.

La trace est la moyenne des acquisitions réalisées en une position des antennes ; elle est améliorée par l'augmentation du nombre de *stacks* si le niveau du bruit ambiant est important.

Ensuite, il faut déterminer le pas d'échantillonnage en distance. Il est fonction de la taille et de l'objectif à atteindre, ainsi que de la fréquence des antennes. Si l'enregistrement est réalisé pour étudier les structures en détail, alors un petit pas est nécessaire pour bien suivre l'évolution des pendages et les changements de roches. Un pas de mesure trop grand entraîne un sous-échantillonnage qui empêche de suivre correctement les réflecteurs.

II.3.Réalsatlon des mesures.

Le déplacement des antennes se fait pas par pas ou en continu ; nous avons travaillé pas par pas.

Lorsque les antennes sont solidaires, une seule personne suffit à les déplacer. Sinon, deux opérateurs sont nécessaires pour que les mesures soient faites assez rapidement.

Ils positionnent les antennes au début du profil, avec la séparation déterminée grâce à l'essai. Un troisième opérateur déclenche l'acquisition qui provoque l'émission d'un

bip sonore. Ce bip dure le temps de l'acquisition, signifiant aux opérateurs de rester immobiles pendant cette durée. Puis les opérateurs déplacent les antennes du pas de mesure choisi et l'acquisition se poursuit ainsi tout le long du profil. L'ensemble formé par la console et l'ordinateur est déplacé le long du profil dans un chariot, ou bien il est porté par le troisième opérateur.

Les photos de la page suivante montrent l'acquisition d'un profil.

Lors de nos manipulations, des difficultés ont été rencontrées.

Tout d'abord, nous avons choisi un chariot pour déplacer la console radar et l'ordinateur le long des profils. Mais ce système s'est avéré inadapté aux terrains accidentés, en pente ou dont la surface du sol est très irrégulière. Un système de portage est donc sûrement plus adéquat.

D'autre part, les antennes sont très sensibles à l'environnement aérien. Ainsi, nous pouvons très bien voir sur l'enregistrement de la figure 2 l'effet d'une table métallique sur laquelle étaient posés l'ordinateur et la console. Nous avons pourtant pris la précaution de placer l'ensemble à une dizaine de mètres du profil, mais cela est visiblement insuffisant...

L'enregistrement de la figure 3 montre, dans le bas de la section, des ondes réfléchies sur une drag-line qui travaillait à proximité de nous.



Réalisation d'un profil au Sénégal oriental (Sabodala, site n°2) sur terrain accidenté.



Réalisation d'un profil dans la vallée du fleuve Sénégal, à Pontgari.



Une drag-line est un engin d'une quinzaine de mètres de hauteur et environ vingt mètres de longueur. Grâce à un godet au bout d'une flèche, elle extrait le phosphate ; elle est entièrement recouverte d'une carrosserie métallique. Elle pivote sur elle-même pour pouvoir vider le godet dans un camion qui attend sur la piste. Mais son axe n'est pas tout à fait centré. En effet, lorsque la drag-line charge un camion, elle se trouve parallèle au front de taille au-dessus duquel nous travaillions. Par contre, lorsque la drag-line remplit le godet de phosphate, elle est dos au front de taille, et elle est alors plus proche du front de taille que lorsqu'elle se présente sur le côté.

Il est possible de connaître la position de la drag-line grâce à cet enregistrement. Lorsque le bruit provoqué par la drag-line commence aux environs de 250 ns, cela signifie que la drag-line est à une distance plus petite que lorsque le bruit commence vers 280 ns. On en déduit ainsi que la drag-line se présentait dos au front de taille lorsque le bruit commence à 250 ns ; elle était de côté lorsque le bruit commence plus tard.

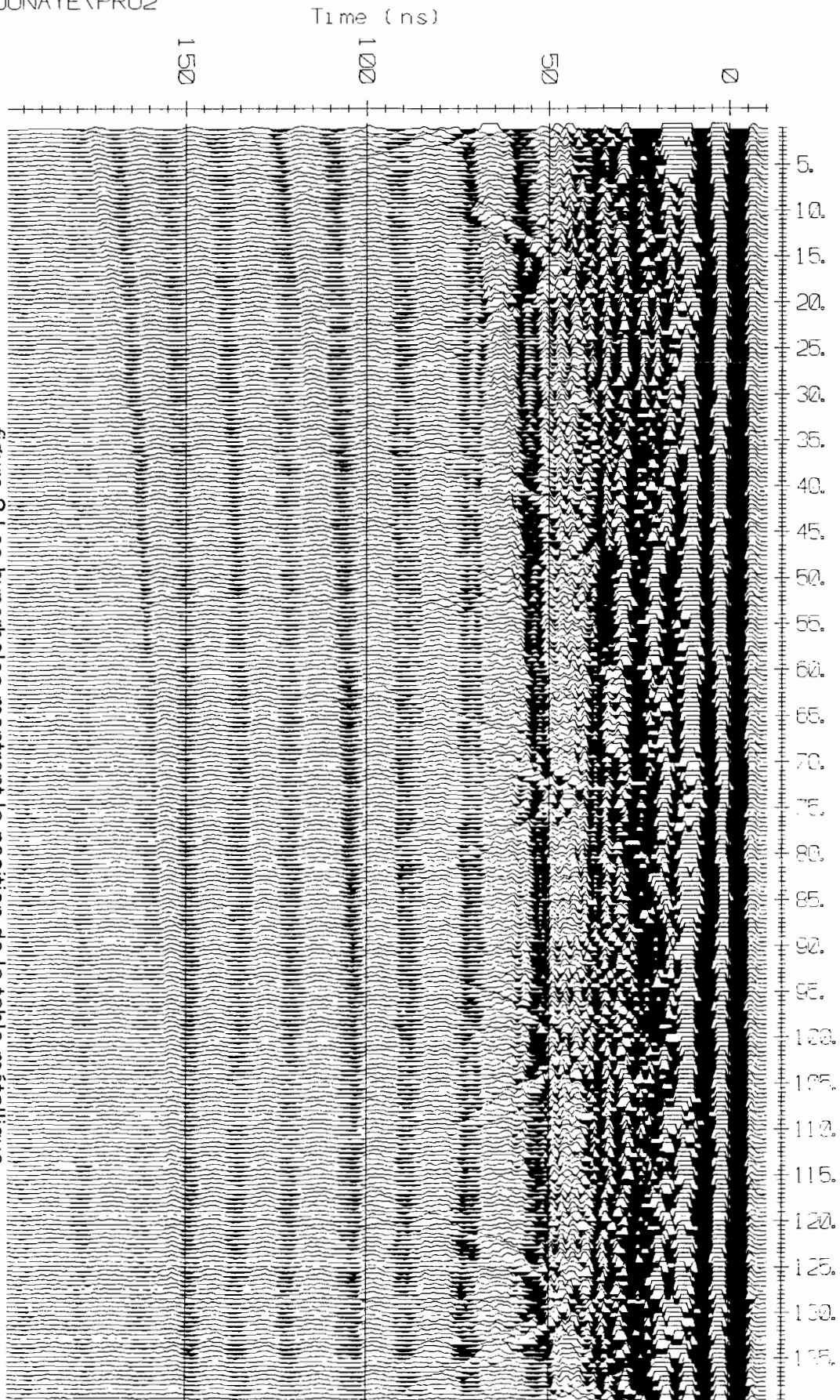


figure 2. Les hyperboles montrent la position de la table métallique.

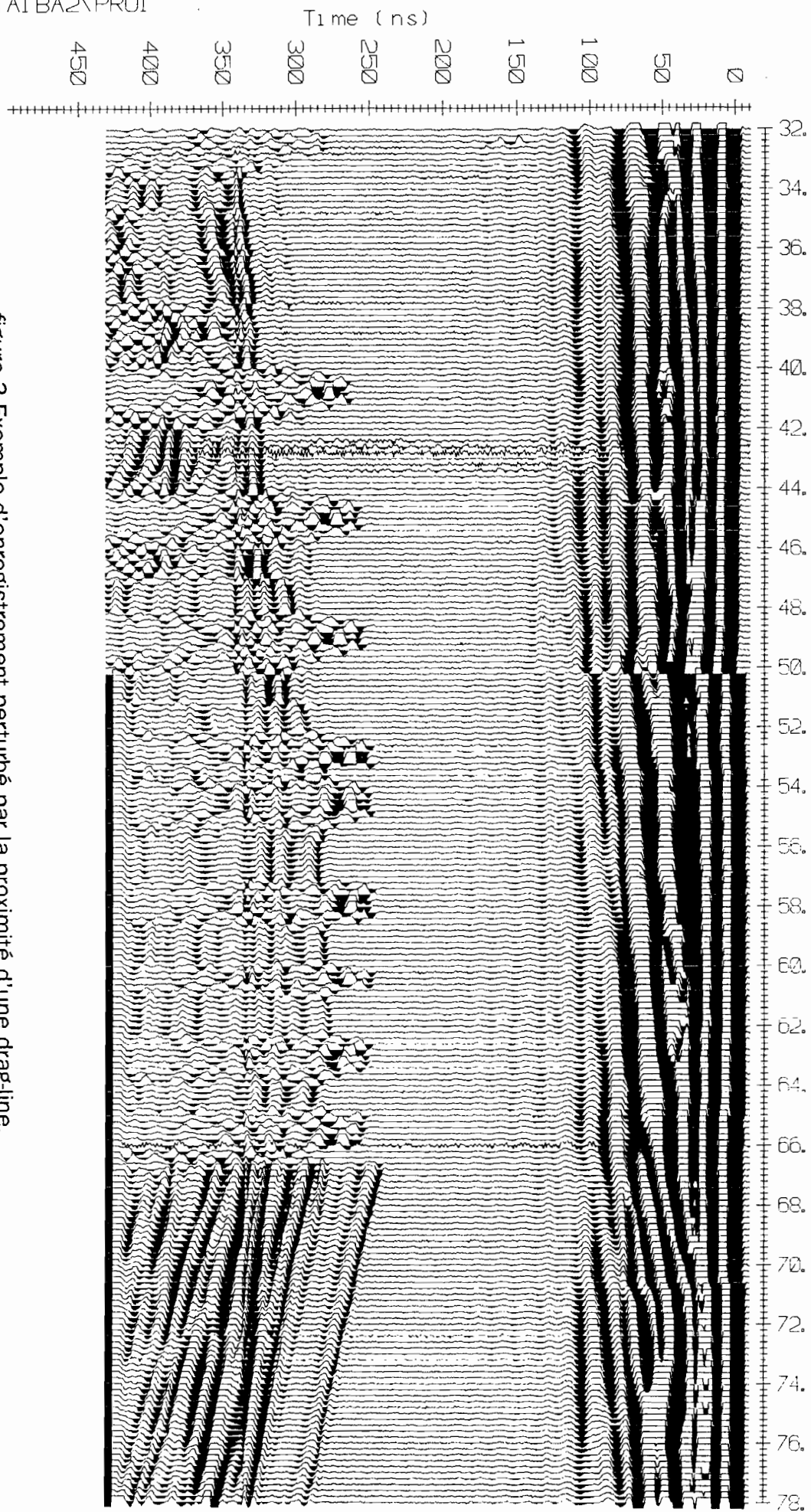


figure 3. Exemple d'enregistrement perturbé par la proximité d'une drag-line.

II.4.Conclusion.

L'installation du matériel est assez rapide et l'exécution des mesures est facile : le radar demande donc une logistique peu lourde.

Les paramètres d'acquisition doivent être déterminés par un spécialiste, mais le profil peut ensuite être réalisé par des manœuvres. En général, trois personnes suffisent à la réalisation des mesures : deux déplacent les antennes, la troisième porte la console et l'ordinateur.

Il faut environ une heure pour déterminer les paramètres de mesures et réaliser un profil de cinquante mètres, avec un pas de vingt centimètres, sur un terrain dégagé. Cependant, il se peut que la préparation de l'acquisition des mesures le long du profil soit plus longue. En effet, un bon choix des paramètres permet d'obtenir des données beaucoup plus facilement exploitables. Il faut donc que les essais préliminaires soient correctement réalisés, et il ne faut pas hésiter à en recommencer certains si les résultats ne sont pas clairs. Un profil pour lequel les paramètres d'acquisition auront été correctement choisis peut être interprété directement. Dans le cas contraire, un traitement des données, qui peut être long, s'impose.

CHAPITRE III :
TRAITEMENT DES DONNEES

III.1.Introduction.

Le traitement des données comporte plusieurs étapes, les premières sont indispensables.

Il s'agit tout d'abord de la mise en forme des données.

Il est parfois nécessaire de réorganiser les données. Par exemple, si un profil a été réalisé en plusieurs fois, il faut fusionner les différents fichiers de données.

D'autre part, lorsque le terrain n'est pas plan, il faut inclure la topographie des lieux dans les données afin d'améliorer l'image radar.

La seconde étape indispensable est l'application de gains temporels. Ils changent la représentation d'une section, c'est pourquoi il faut en appliquer plusieurs pour voir toute l'information. Cependant, le choix du "meilleur" gain dépend de la section et de l'utilisateur ; il est donc subjectif visuellement.

Ensuite, il peut être nécessaire d'appliquer des filtrages simples, temporels ou spatiaux.

L'étape suivante est l'élaboration de traitements plus avancés comme le filtrage F,k par exemple.

Enfin, il faut transformer les sections radar en images exploitables. La représentation est choisie par l'utilisateur.

En général, chaque terrain implique un traitement différent : il est donc impossible de décrire un traitement unique qui serait adapté à toutes les situations. D'autre part, nous ne décrirons pas tous les traitements possibles, cela serait inutile et redondant avec le manuel d'utilisation. Mais nous présenterons les principaux outils que nous avons utilisés.

III.2.Présentation du logiciel.

III.2.1.Mise en forme des données.

Avant de traiter les données, il faut les mettre en forme. Il arrive en effet que l'opérateur se trompe en rentrant les paramètres de l'acquisition. Il peut par exemple donner un pas d'échantillonnage qui n'est pas celui qui a été utilisé pendant les mesures. Les abscisses de la section ne sont alors pas les réelles positions des stations de mesures.

D'autre part, avant de fusionner deux fichiers correspondant au même profil, il faut s'assurer de la cohérence des abscisses. En effet, il faut que la première mesure du second fichier ait la position de la dernière mesure du premier fichier, incrémentée du pas de mesure.

Grâce au menu EDIT du logiciel, il est possible de modifier tous les paramètres enregistrés à l'acquisition : position de départ, pas de mesure, titre du profil, fréquence d'antennes...

CURRENT EDIT PARAMETERS

File	Input Dir: C:\EKKO\GADE Output Dir: C:\EKKO\GADE	Filename: GADNE1 Filename: GADNE1
Field	Start Position : 1.60000 Surveying Mode : Reflection Title1: tranchée de Gade Title2:	Step Size : 0.200 Antenna Sep: 1.500
	Ant. Frequency: 200.000 MHz Distance Units: metres Timezero (pts): 41	Pulser Voltage: 400 V Job Number :
Section	End Time: 397 ns	Trace Range: 1 to 93

NO files	Exit	Field_line	Ascii file	Job
old_trace	Options	PointEdit	Selection	Topography

Sensors & Software pulseEKKO EDIT V 4.0

III.2.2. Gains.

Une section à laquelle aucun gain n'est appliqué présente en général les deux trains d'ondes correspondant aux ondes directes dans l'air et dans le sol. Afin de pouvoir observer les signaux jusqu'aux temps les plus grands, il est nécessaire d'appliquer un gain temporel à la section.

Cinq gains sont proposés : AGC (*Automatic Gain Control*), SEC (*Spreading & Exponential Compensation*), CONSTANT, NONE et USER, que crée l'utilisateur.

AGC	Automatic Gain Control. Attempts to equalize all signals by applying a gain which is inversely proportional to the signal strength. Does not preserve amplitude information; i.e. relative signal strength between reflectors becomes meaningless. Useful for defining continuity of reflecting events.
SEC	Spreading and Exponential Compensation. Attempts to compensate for spherical spreading losses and exponential ohmic dissipation of energy. Must be limited because it can go to infinity.
CONST	Multiplies all data by a constant factor.
USER	User-defined Gain. Gain is read from user-created ASCII file with .GAN extension that contains times and multiplication factors.

ins
c Sec Const User Return

for Descriptions
ensors & Software EKKO TOOLS V 1.1

Description des gains par le logiciel.

Le gain AGC tend à égaliser tous les signaux en appliquant un gain inversement proportionnel à l'intensité du signal. Ce type de gain est surtout utile pour souligner la continuité des réflecteurs. Il a cependant l'inconvénient de ne pas préserver les

amplitudes relatives : lorsqu'un gain AGC a été appliqué aux données, il n'est plus possible de comparer l'intensité relative de deux réflecteurs, l'un par rapport à l'autre.

NONE signifie qu'aucun gain n'est appliqué à la section.

Le gain USER est créé par l'utilisateur en donnant des valeurs de gains en fonction de la profondeur en temps. Il permet de souligner des événements qui se passent dans une tranche temporelle précise par exemple.

Lorsqu'une section est représentée avec un gain CONSTANT, le même gain est appliqué à toute la section. Il en résulte que les informations des premières nanosecondes sont mises en évidence et le bas de la section est atténué. Or il existe parfois du signal jusqu'en bas de la section. Il arrive donc que l'utilisateur ne voit pas toute l'information. Pour éviter cela, il est préférable d'utiliser un gain SEC.

Le gain SEC est une composition d'un gain linéaire et exponentiel, qui permet donc d'augmenter le niveau d'énergie du bas de la section et de mettre en valeur tous les réflecteurs. Il permet de compenser l'atténuation des ondes.

C'est le seul gain physique : les paramètres que l'utilisateur entre sont la vitesse et l'atténuation des ondes dans le sol, qui peuvent être évaluées en fonction de la nature du terrain.

Les autres gains sont des gains uniquement graphiques : la représentation de la section ne se base pas sur des caractéristiques du terrain.

III.2.3. *Filtres temporels.*

Certaines sections pour lesquelles les antennes n'ont pas été suffisamment séparées présentent du *system ringing*. Pour éliminer ce bruit, nous avons appliqué des filtres temporels aux sections.

La fréquence de Nyquist est calculée selon :

$f_N = 3 \cdot f_{\max} / 2$ où f_{\max} fréquence maximale pour une fréquence d'antenne donnée, soit 150 MHz pour des antennes de 100 MHz ;

$f_e = 2 \cdot f_N$ où f_e fréquence d'échantillonnage ;

donc $f_e = 3 \cdot f_{\max}$

et $T_e = 1 / f_e$ où T_e période d'échantillonnage ;

soit $T_e = 1 / (3 \cdot f_{\max})$

donc $f_N = 1 / (2 \cdot T_e)$.

A 100 MHz, $f_e = 450$ MHz donc il faut que $T_e < 2,2$ ns pour éviter le phénomène de recouvrement de spectre (*aliasing*). Pour la même raison, à 200 MHz, il faut que $T_e < 1,1$ ns. Le logiciel permet de choisir la valeur 800 ps soit 0,8 ns pour la fréquence d'échantillonnage. La fréquence de Nyquist est alors égale à 625 MHz.

III.2.4. Représentation des traces.

Les traces sont dessinées en aire variable ou en couleurs. Nous avons essentiellement utilisé la représentation en aire variable, mais la couleur est parfois utile pour faire ressortir des événements.

Le logiciel permet de choisir la distance entre deux traces (*spacing*) ainsi que la largeur d'une trace (*width*).

La page suivante montre le même enregistrement avec des représentations différentes :

- figure 4. espacement entre deux traces = 0,2 inches,
 largeur d'une trace = 0,2 inches,
 noircissement de la partie droite des traces ;

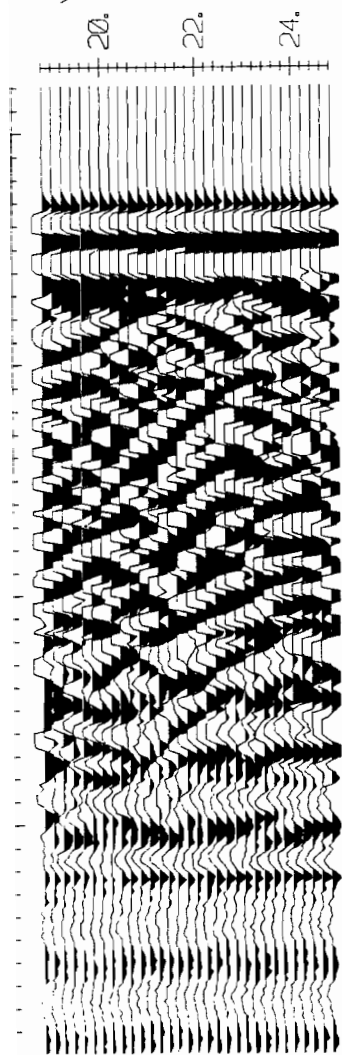


figure 5.

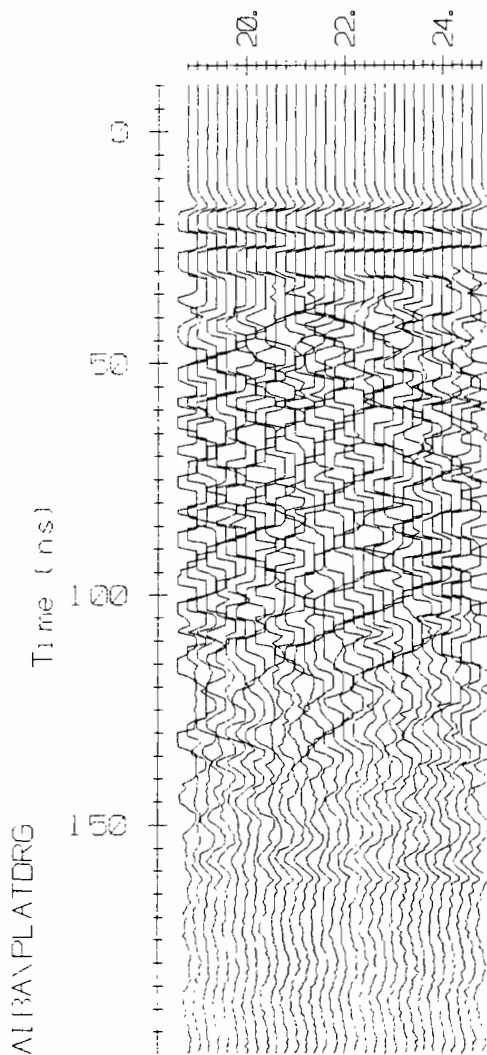


figure 6.

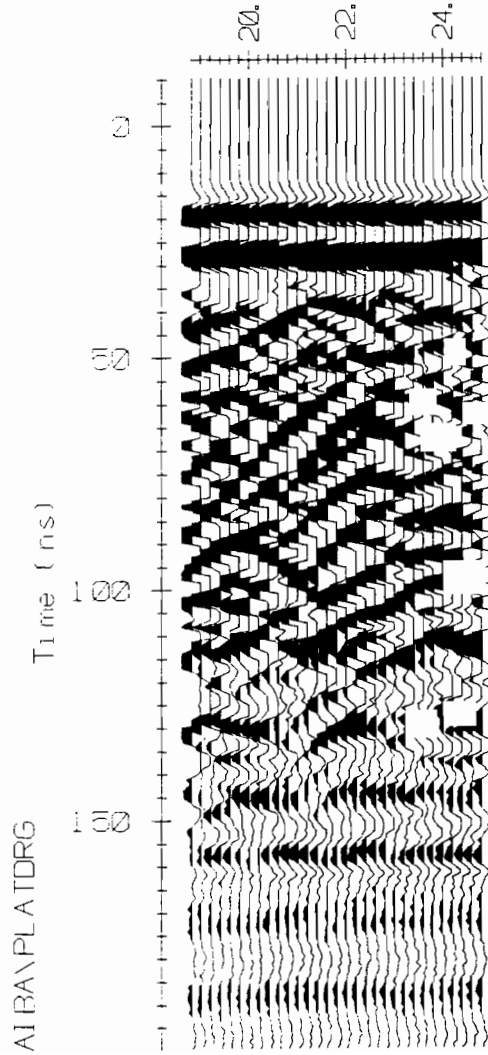


figure 7.

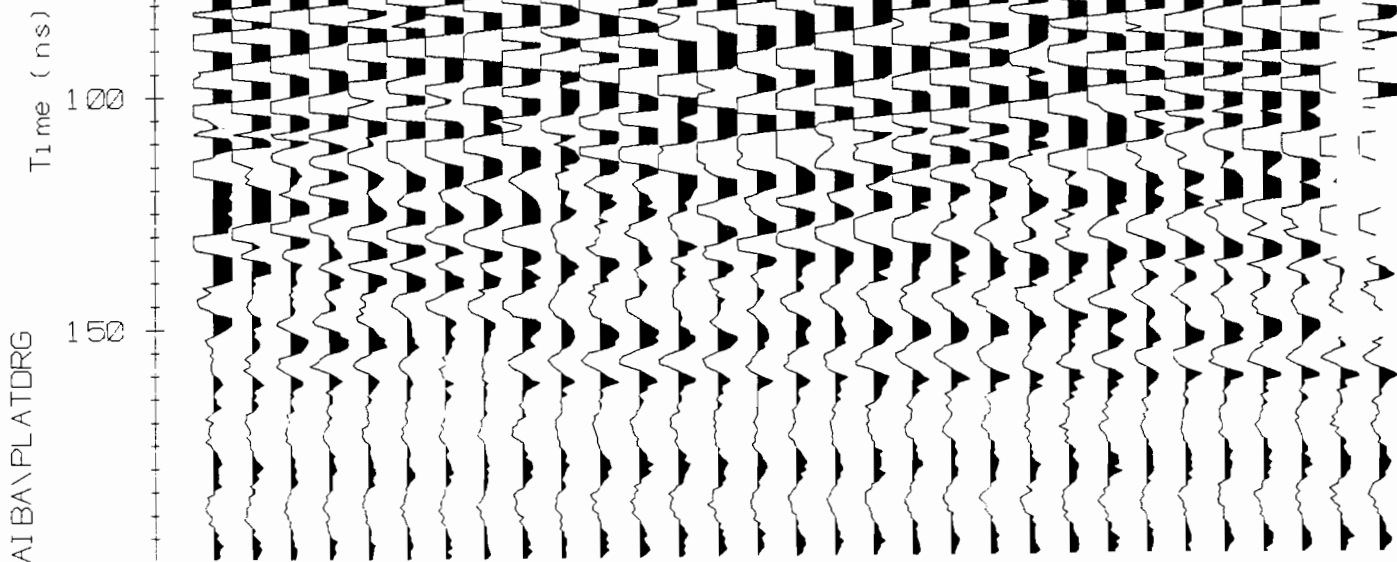


figure 4.

- figure 5. espacement = 0,05 inches,
 largeur = 0,1 inches,
 noircissement de la partie droite des traces ;
- figure 6. espacement = 0,05 inches,
 largeur = 0,1 inches,
 pas de noircissement des traces ;
- figure 7. espacement = 0,05 inches,
 largeur = 0,1 inches,
 noircissement de la partie gauche des traces.

On remarque que l'espacement des traces a une grande influence sur la vision que l'on a de la section. Lorsque les traces sont très espacées, il est difficile de suivre les horizons. En revanche, si les traces sont serrées, les réflecteurs sont beaucoup plus visibles et l'impression visuelle est meilleure. On choisit donc en général une représentation pour laquelle les traces sont assez serrées et leur largeur est suffisante pour qu'elles se recouvrent : par exemple, que la largeur soit égale à deux fois l'espacement.

III.3.Applications.

Tout d'abord, il est recommandé par le fabricant d'appliquer un filtre passe-haut (*DEWOW*) afin d'éliminer la composante très basse fréquence du signal.

Puis, lorsque les données ont été correctement mises en forme, le traitement suivant est de caler toutes les traces grâce à l'option *1ST PICK* (figure 8).

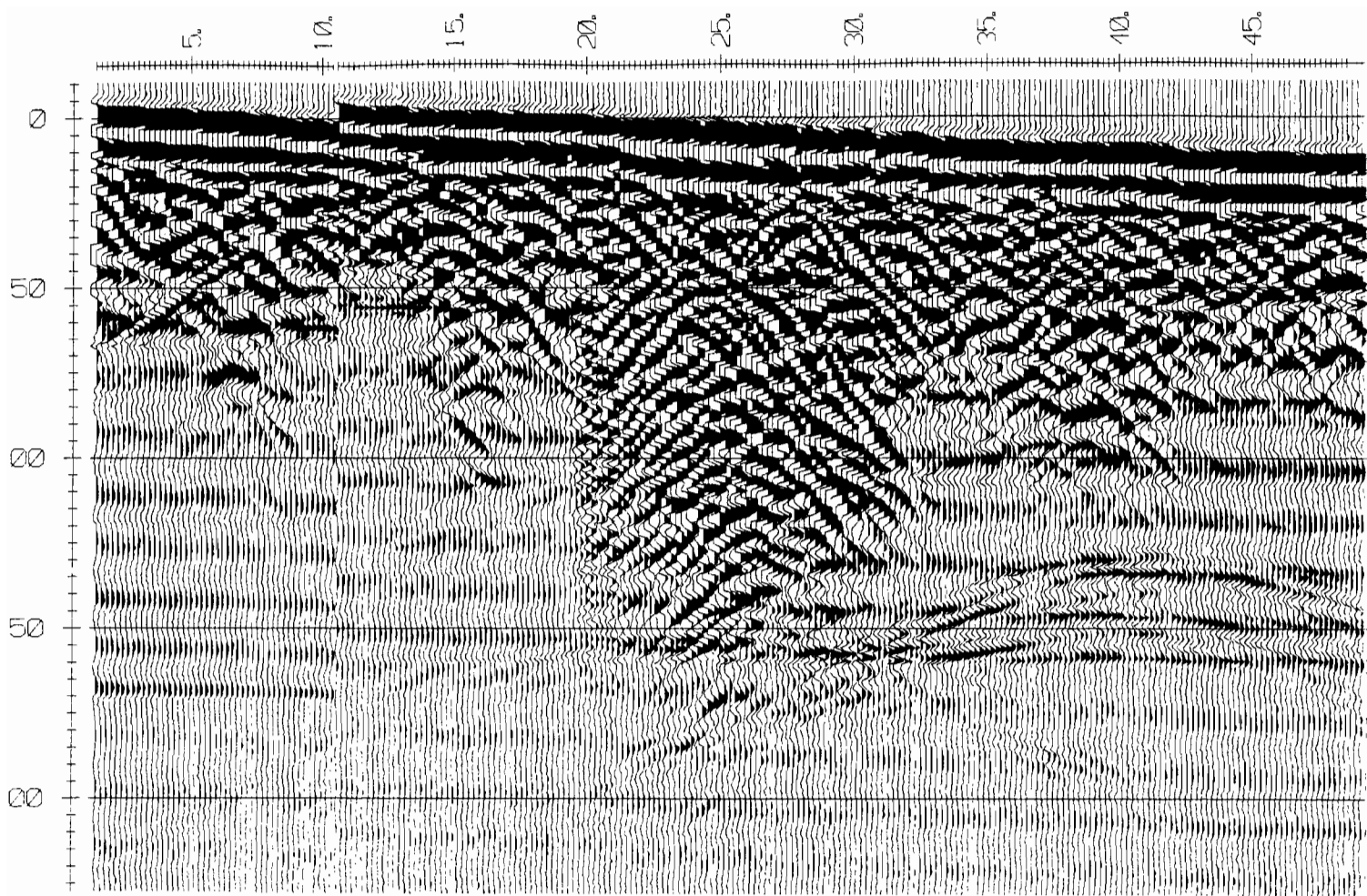
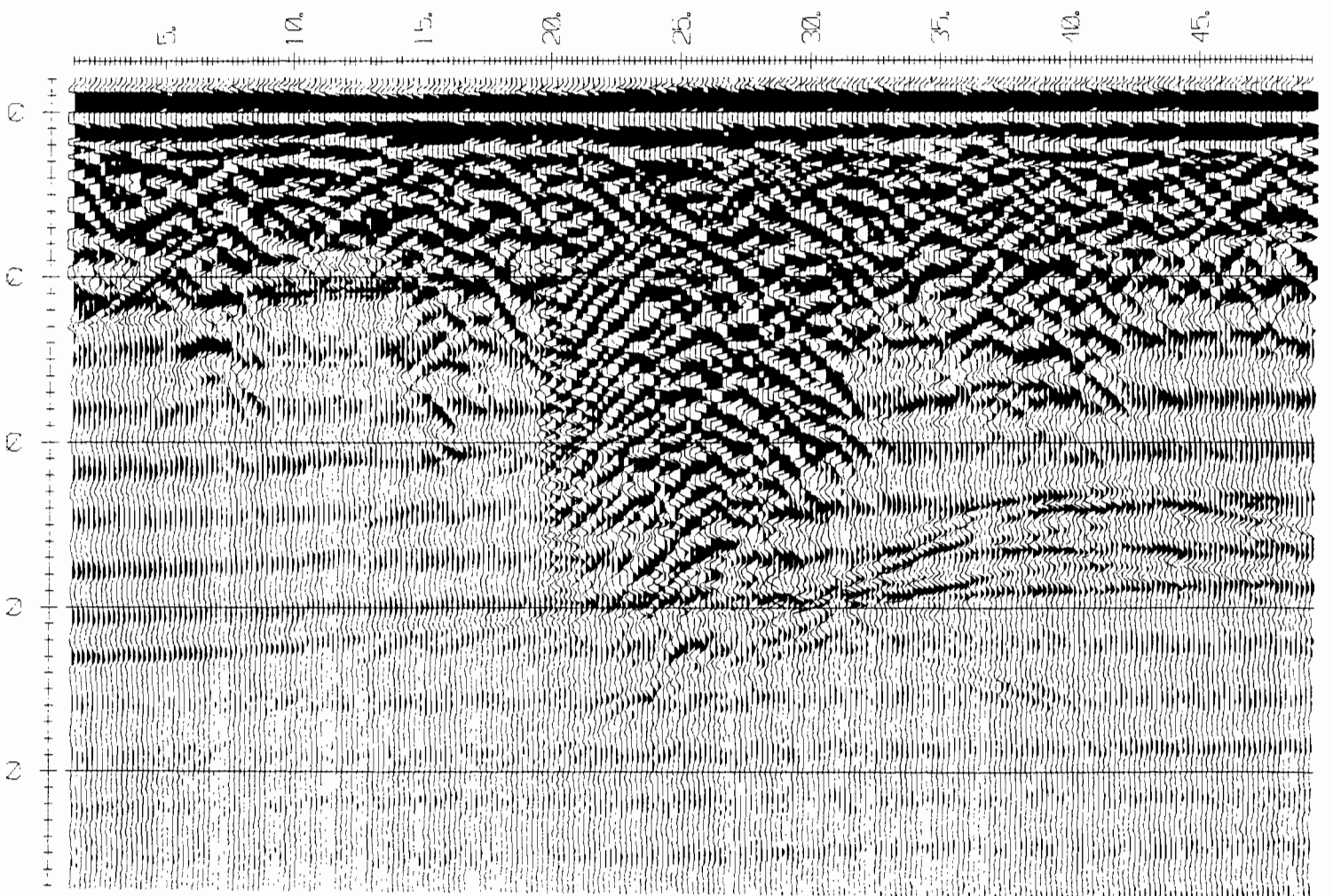


figure 8. Calage de toutes les traces.



Cela est nécessaire lorsque l'on observe que la première onde n'arrive pas à un temps t_0 constant. Nous avons remarqué que cette dérive est due en général au fait que la console radar n'a pas eu le temps de chauffer ou de se mettre à la température ambiante avant le début des mesures.

En sélectionnant l'option *1st PICK*, l'utilisateur donne la valeur du seuil qui va servir à caler les traces. Ensuite, le logiciel élimine les points des traces dont la valeur est inférieure au seuil et qui sont situés dans la partie haute de la section. Cela a pour but de remonter au même niveau, d'une trace à l'autre, les points dont la valeur est égale au seuil.

Il est ensuite plus facile de suivre les réflecteurs.

Lorsqu'un gain SEC est appliqué après que la section a été calée, l'impression visuelle n'est plus la même : il semble que les réflecteurs sont plus atténués. En réalité, ceci est dû au fait que le gain a la forme d'une rampe exponentielle.

Avant que la section soit calée, le gain appliqué aux premiers points de la trace, qui correspondent à l'arrivée de l'onde directe dans l'air, est faible. Il augmente avec le temps (ou la profondeur) le long de la trace. Il en résulte que l'onde dans l'air apparaît beaucoup plus faiblement sur la section à laquelle a été appliqué le gain SEC.

Après le calage de la section, les faibles valeurs du gain sont appliquées à des points qui étaient plus bas dans la section avant calage. Ceci conduit à appliquer des gains plus faibles sur l'ensemble de la section, d'où cette impression d'atténuation générale, comme on peut le constater sur les figures 9 et 10.

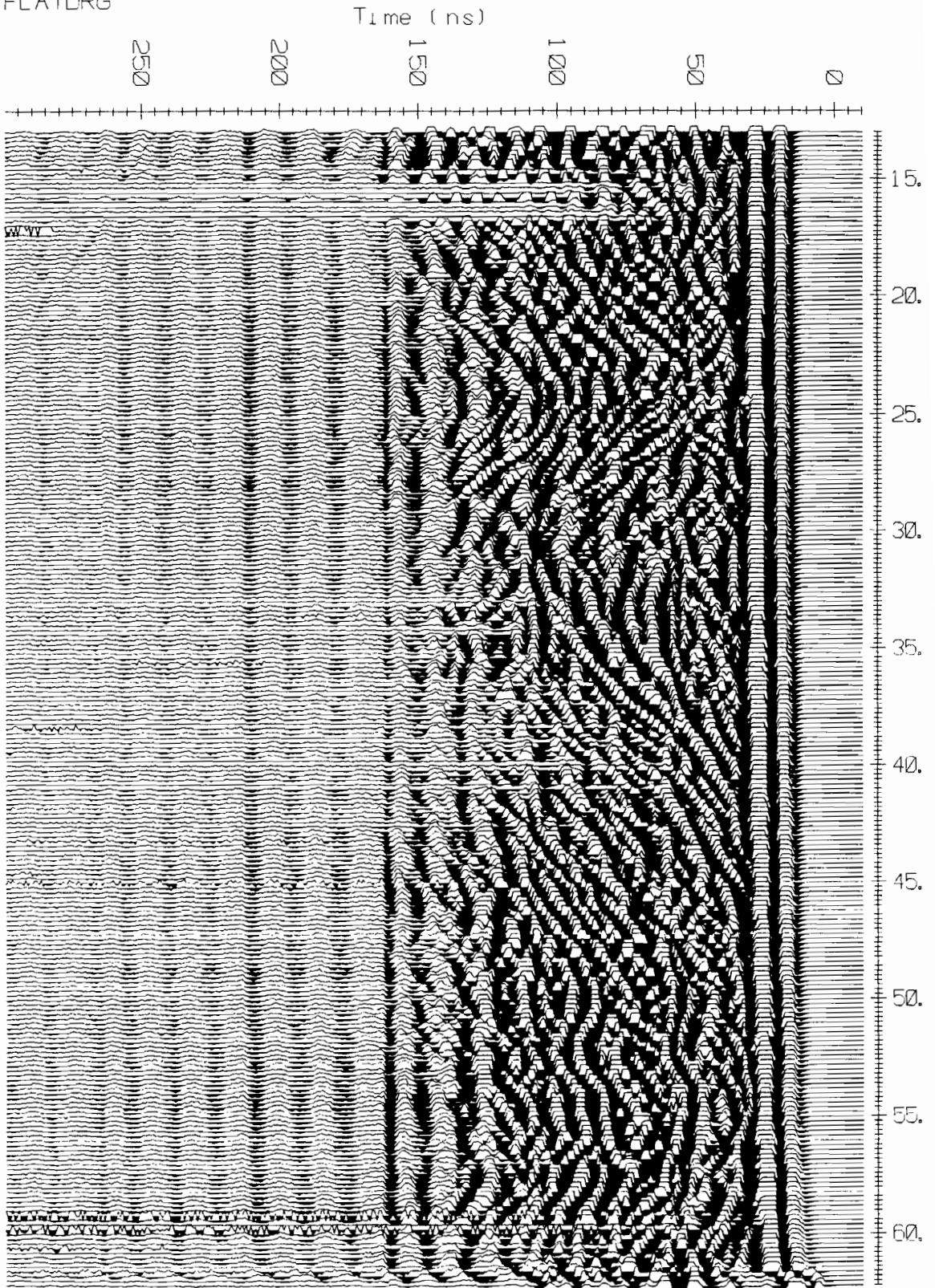


figure 9. Profil non calé. Gain SEC, gmax=0,1, att=5dB/m.

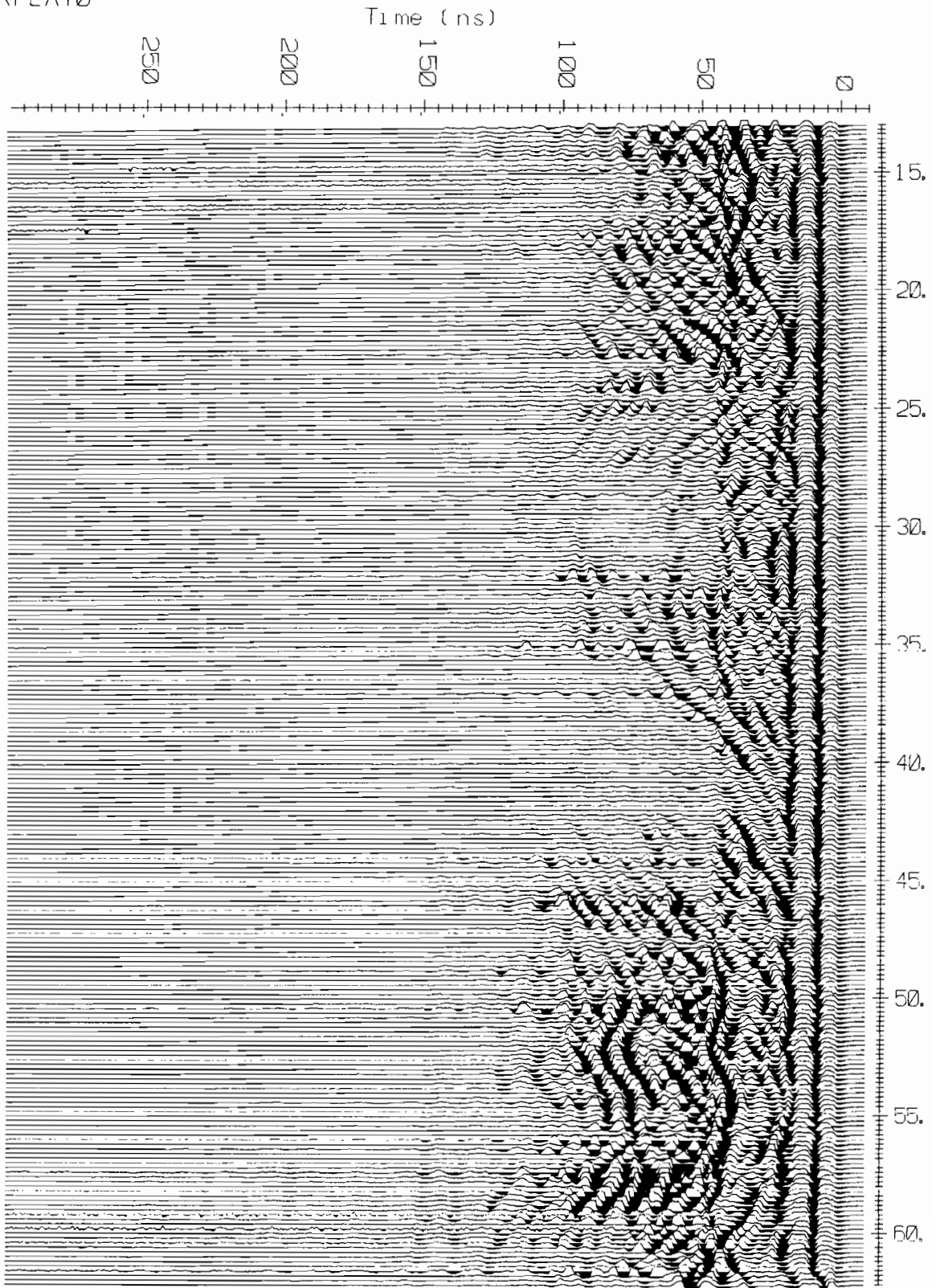


figure 10. Profil calé. Gain SEC, gmax=0,1, att=5dB/m.

La figure 11 présente une section à laquelle a été appliquée la topographie du lieu. Cela a pour objet de rétablir le réel pendage des couches. En effet, des réflecteurs peuvent apparaître horizontaux lorsque la section est brute mais être inclinés, en réalité. Toutefois, il faut prendre garde à la distorsion des pendages qui peut résulter d'une différence de l'échelle des abscisses et des ordonnées, comme c'est le cas sur cette figure.

L'élévation, représentée par l'axe à droite de la section, est calculée grâce à une hypothèse de vitesse que l'utilisateur donne. La vitesse appliquée ici est celle qui a été mesurée dans le filon de quartz : partie centrale de l'enregistrement où les ondes se propagent plus profondément. Cette élévation est donc exacte pour la partie centrale mais peut-être fautive pour l'encaissant.

Les figures 12 et 13 montrent l'effet de différents gains sur la même section.

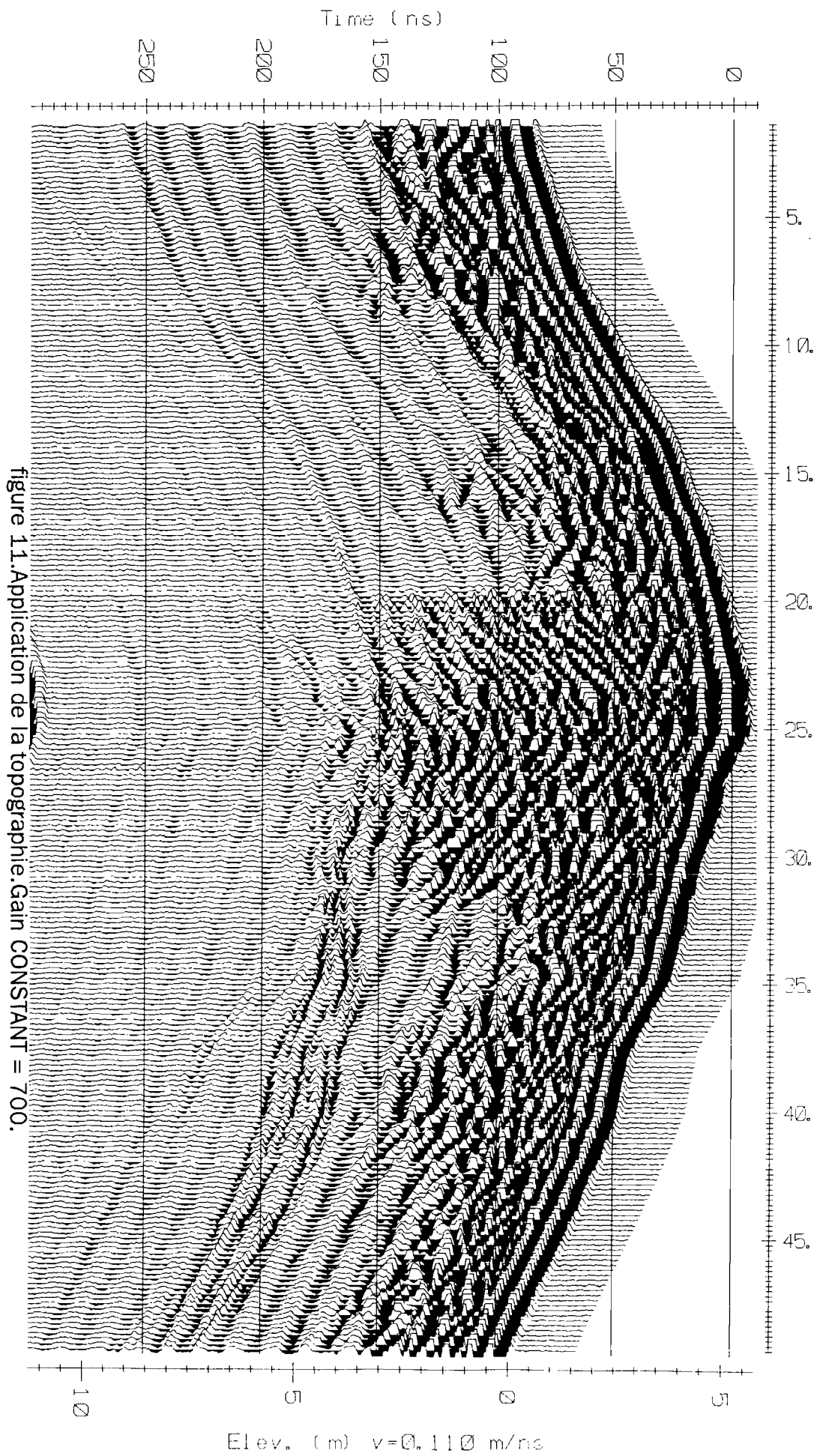


figure 11. Application de la topographie. Gain CONSTANT = 700.

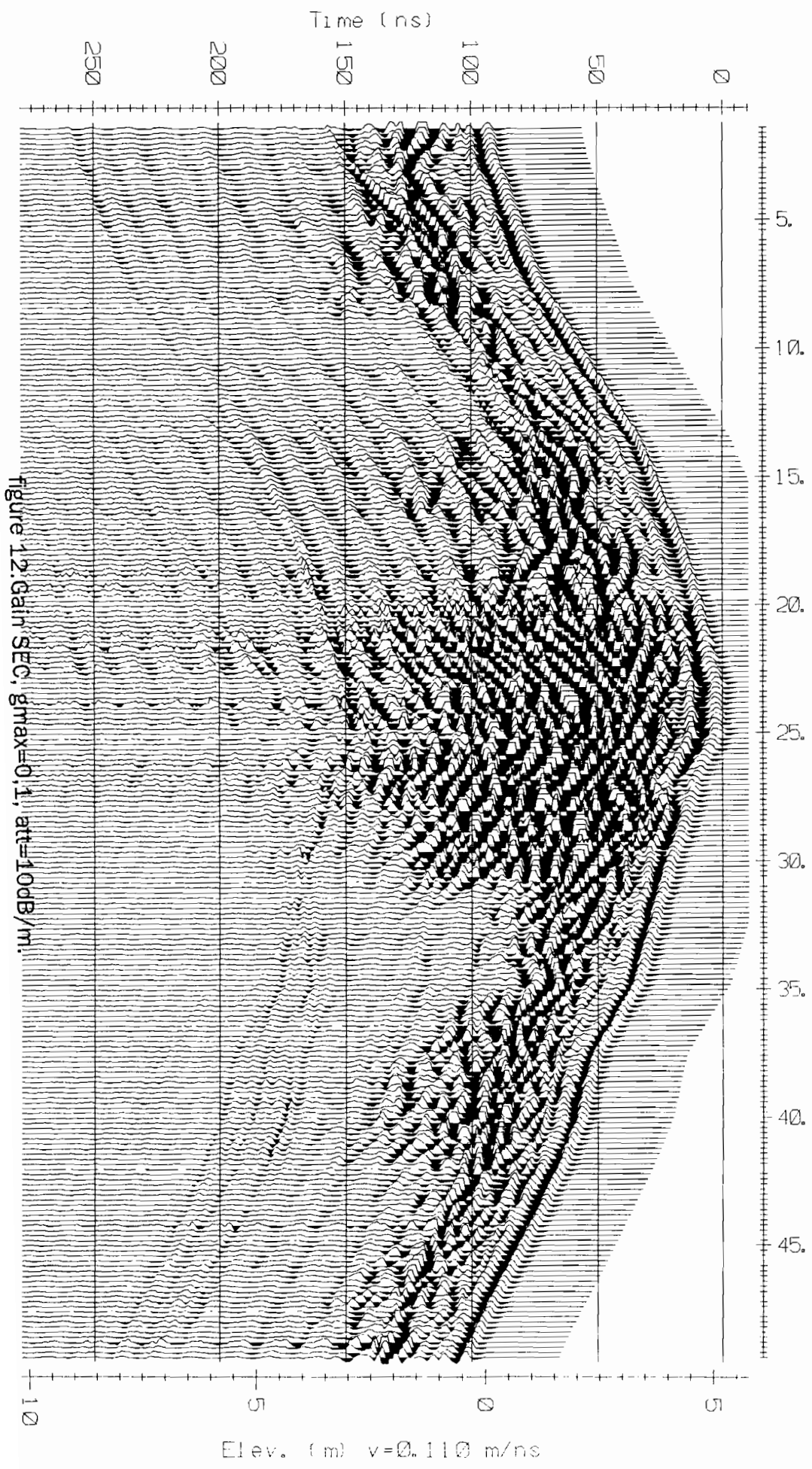


Figure 12: Gain SEC, gmax=0.1, att=100dB/m.

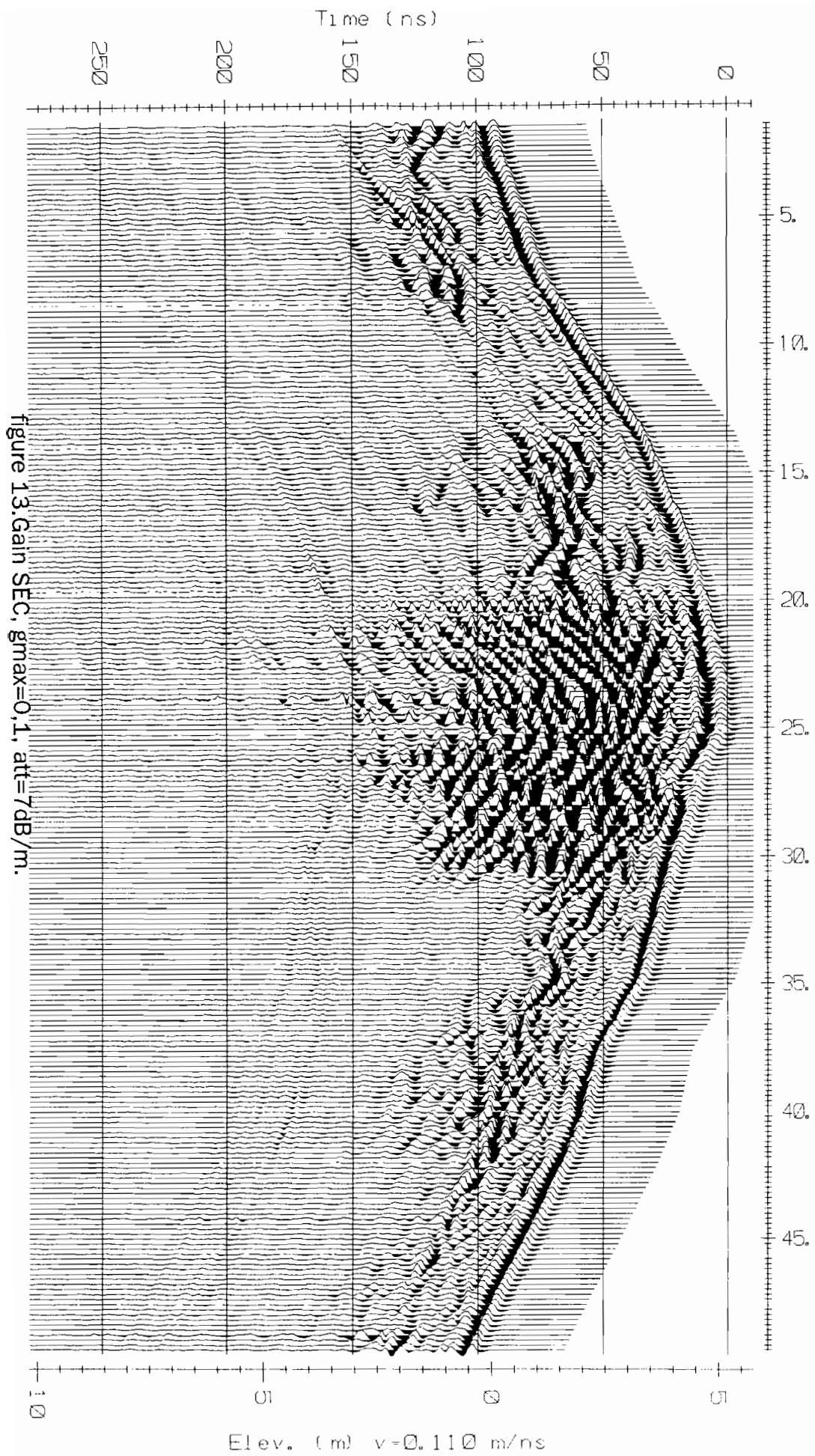


figure 13. Gain SEC, $g_{max}=0.1$, $att=7$ dB/m.

III.4.Remarques et conclusion.

Les quelques applications de filtres que nous avons faites nous ont conduits aux conclusions suivantes :

un passe-haut produit des artefacts, un passe-bande trop raide n'est pas efficace ;

une renumérisation n'introduit pas d'information mais peut améliorer les zooms ;

l'application d'un gain SEC avant le filtrage en fréquence améliore le signal filtré.

Il est important d'effectuer le calage des traces avec *1st PICK*, et surtout essentiel d'appliquer différentes valeurs de gains pour mettre en évidence des réflecteurs.

Enfin, il faut choisir une représentation correcte pour que la section soit facilement lisible à première vue.

CHAPITRE IV :
PRESENTATION DES RESULTATS

Le Sénégal est un pays plat par excellence dans lequel se distinguent deux unités structurales : le bassin tertiaire qui occupe la plus grande partie de la superficie du territoire dont l'altitude dépasse rarement 50 m ; vers l'est au contraire, quelques lignes de hauteur pouvant atteindre 400 m émergent de la plaine, dans la zone où affleurent des terrains plus anciens (Birrimien et Primaire).

Le système hydrographique du Sénégal est simple : les fleuves et les rivières drainent les eaux de la partie orientale du pays et leur sens d'écoulement est en général est-ouest. En raison de la faiblesse de la pente, ces cours d'eau présentent de nombreux méandres, leur largeur est souvent grande et ils se jettent à la mer par de larges estuaires.

Le Sénégal est soumis à un climat tropical caractérisé par deux grandes saisons : la saison des pluies de juillet à octobre ; la saison sèche de novembre à juin. Toutefois, de type sahélien vers le nord, le climat passe au type soudanien vers le sud avec des précipitations supérieures à 1000 mm.

L'action des alizés le long de la côte crée des microclimats frais dans la région de Saint-Louis et dans la presqu'île du Cap-Vert.

IV.1. Indurations argileuses à la mine de phosphate de Taïba.

IV.1.1. Introduction.

L'exploitation du phosphate de calcium se fait à ciel ouvert. Les couches de phosphate sont atteintes après avoir excavé trente mètres de sable. Les moyens mis en œuvre pour l'excavation sont des roues-pelles et des drag-lines dimensionnés pour du sable meuble à moyennement compacté.

Les tailles actuelles rencontrent de plus en plus de niveaux argileux indurés qui gênent considérablement l'exploitation, causant des bris d'outils et des retards à l'avancement.

D'autres méthodes géophysiques ont été testées sur ces indurations, sans apporter de solution satisfaisante. La prospection électrique s'est avérée peu efficace ; par contre, la sismique a mis en évidence les indurations mais c'est une méthode très coûteuse.

Les essais avaient pour objet de savoir si ces différents niveaux sont détectables ou non par le radar, et à plus faible coût que la sismique.

IV.1.2. Géologie.

Le log des terrains rencontrés à Taïba est le suivant.

Vue d'ensemble
de l'extraction
des phosphates de Taïba.

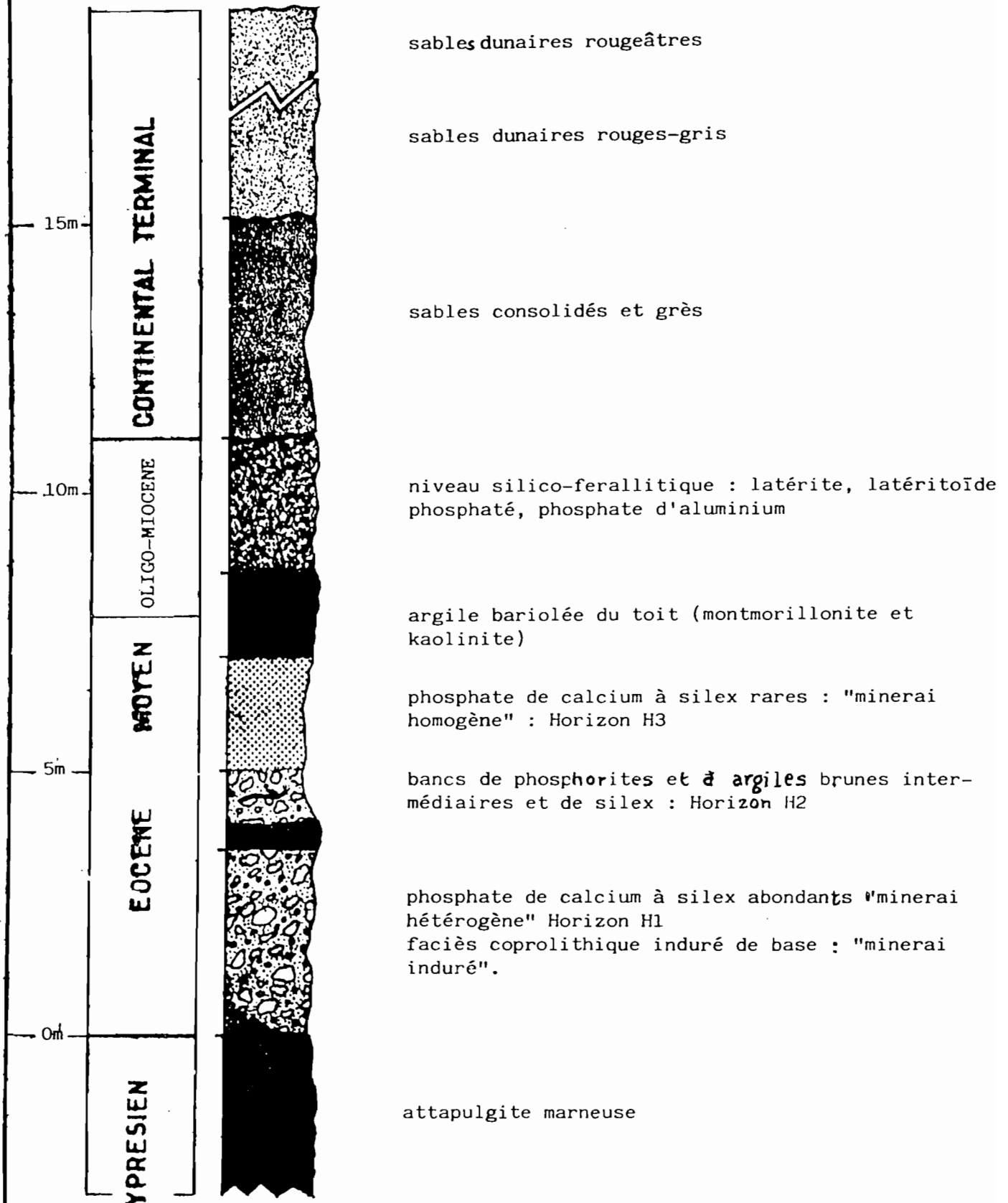


Drag-line.



Réalisation d'un CMP.

LOG TYPE DE LA SERIE PHOSPHATEE DE TAIBA



Ech: 1/100

E. M. SAMB - 1992

Lorsque nous sommes allés travailler à la mine de Taïba, une induration argileuse avait été dégagée sur le front de taille. Nous avons pu travailler juste au-dessus.

Nous avons réalisé des profils parallèles au front de taille pour lesquels nous étions sûrs que les ondes radar rencontreraient l'induration. Nous avons ensuite travaillé à proximité de deux tranchées car elles offraient une coupe géologique.

L'une des tranchées, à Tobène, a été creusée dans des argiles indurées ; l'autre, à Gade, recoupe des latérites. Ces deux types de matériaux posent problème pour l'excavation du sable recouvrant le phosphate. Nous avons donc effectué des mesures sur ces matériaux, le long des deux tranchées.

Les deux paires d'antennes ont été utilisées.

IV.1.3.Résultats.

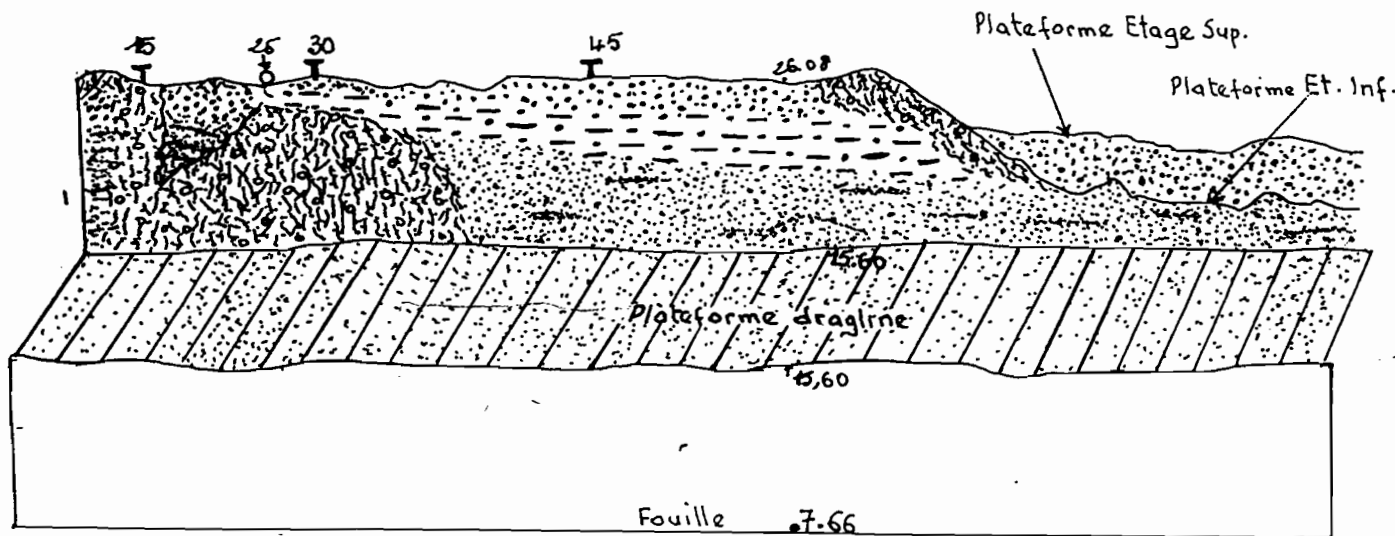
IV.1.3.1.Front de taille.

IV.1.3.1.1.Situation des profils et coupe géologique.

Les deux profils ont été réalisés parallèlement au front de taille, à une distance d'environ trois mètres de celui-ci.

Une induration argileuse de couleur rouge était parfaitement visible ; nous nous sommes positionnés au-dessus d'elle. Elle correspond, sur la coupe N-S, au sable argilo-pélicite induré.

COUPE N - S



Sable arénitique meuble



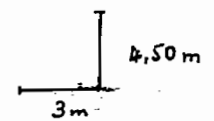
Sable argilo - pelitique induré



Sable silto - arénitique meuble

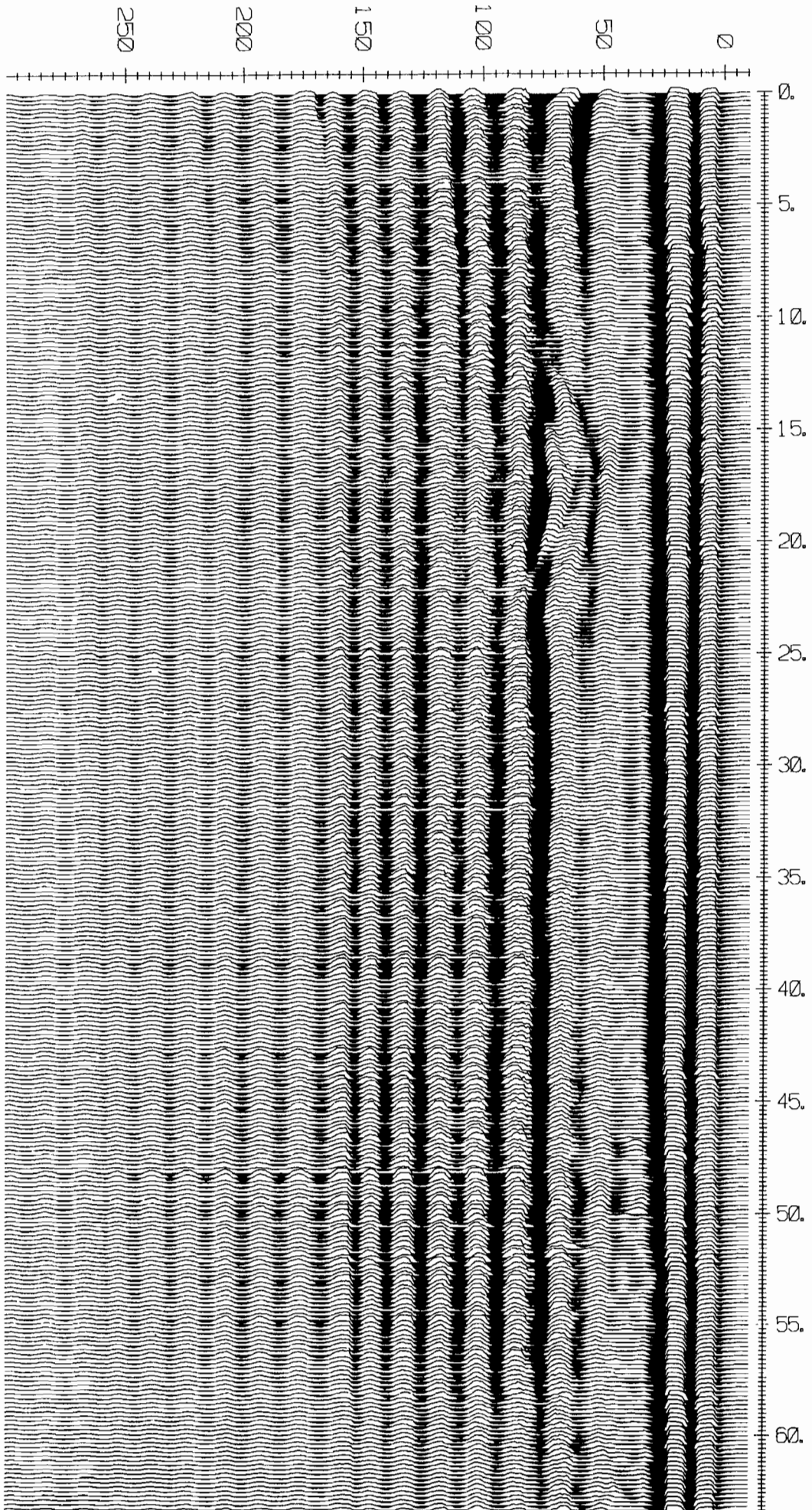


Dépôts d'allérites quartzo-phosphates



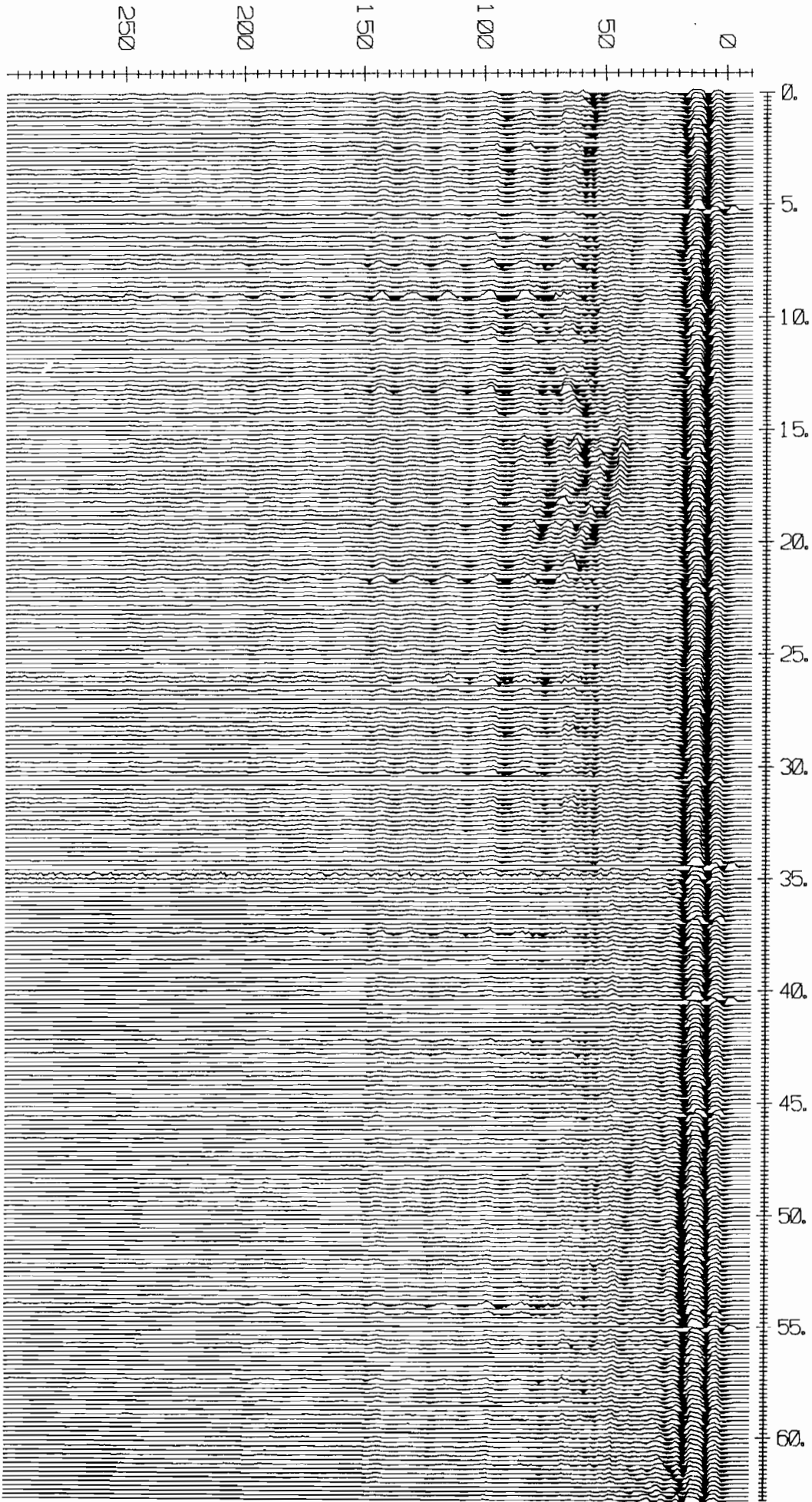
EKKO\TAI BA\ETØ

Time (ns)



EKKO\TAI BA\ET5

Time (ns)



IV.1.3.1.2. Interprétation.

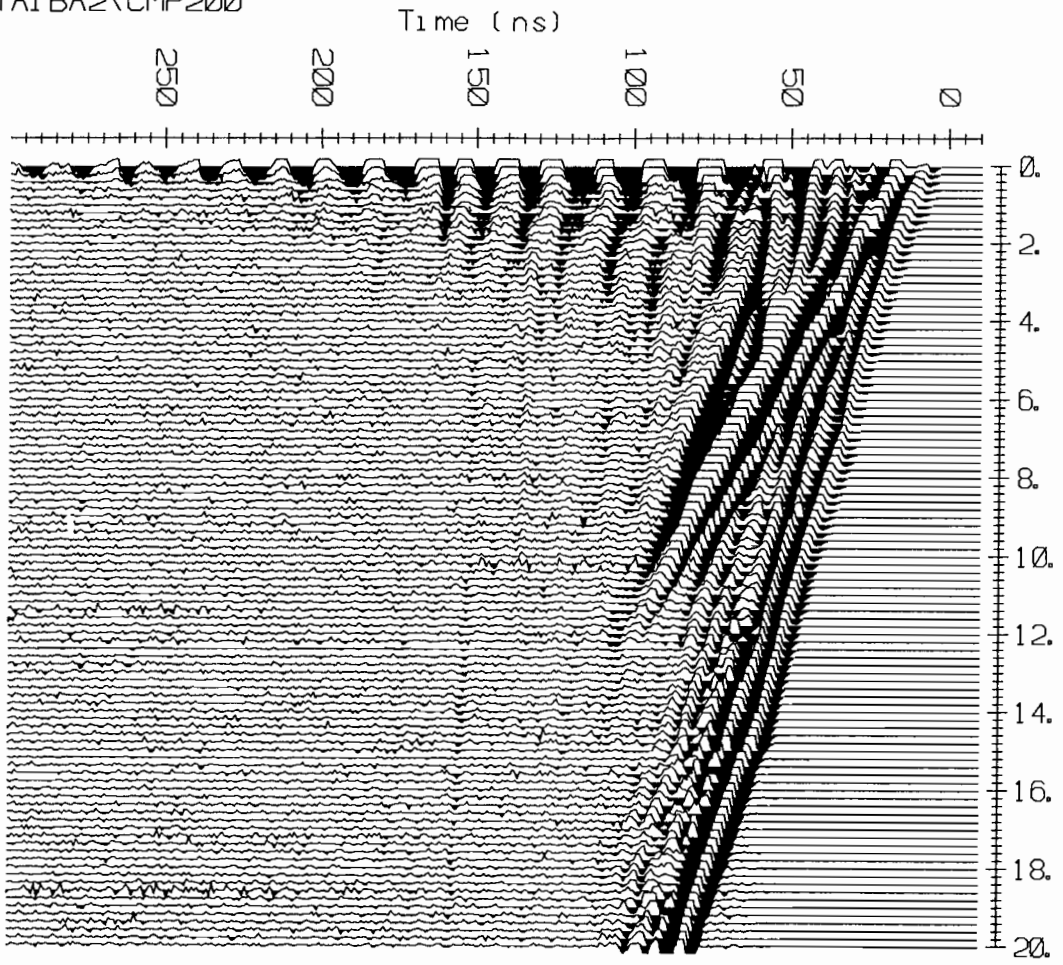
Les premiers enregistrements ne montrent pas de structures géologiques. Leur intérêt est limité. On voit cependant un dôme, à l'aplomb de la position 16 m. En supposant que l'hyperbole est l'image d'un point diffractant, le calcul de la pente de l'asymptote à cette hyperbole donne la vitesse des ondes qui se réfléchissent sur cet objet. Dans ce cas, la vitesse est d'environ 0,12 m/ns, ce qui indique que l'objet est situé en profondeur. Ce dôme n'est pas dû à la réflexion des ondes sur un objet extérieur, auquel cas la vitesse donnée par les asymptotes serait celle des ondes dans l'air, soit 0,3 m/ns.

Les seules informations que nous ayons sont dessinées sur la coupe géologique. Mais celle-ci n'indiquant rien à cette position, nous ne pouvons pas déterminer la nature de cet objet. Nous pouvons cependant calculer sa profondeur : en prenant l'hypothèse d'une vitesse de 0,12 m/ns, étant donné que le sommet de l'hyperbole est au temps 60 ns, la profondeur est alors de 3,60 m.

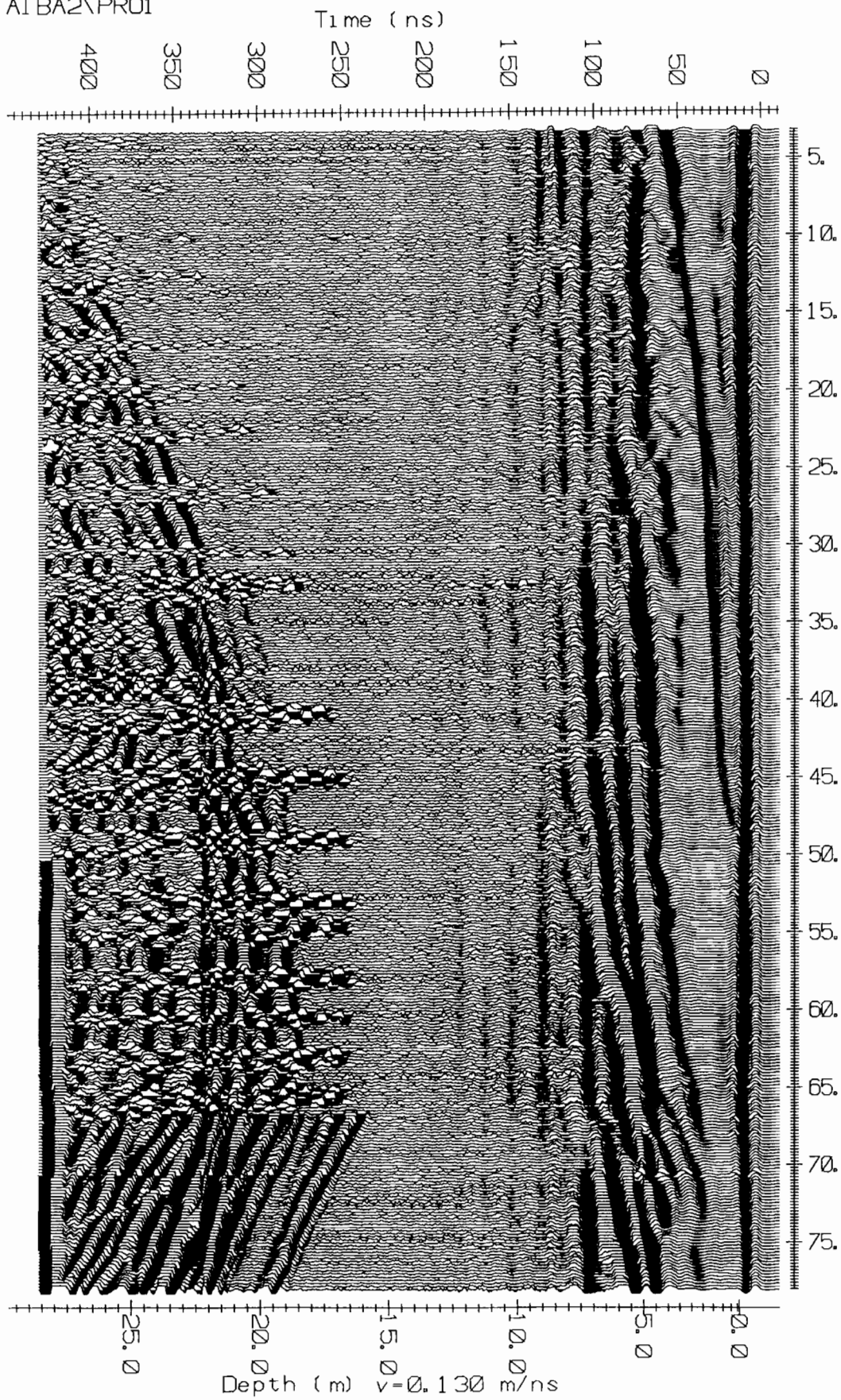
Ces enregistrements sont les premiers réalisés lors de nos missions au Sénégal. Nous ne savions pas encore l'importance de l'écartement des antennes, c'est pourquoi ces sections présentent un couplage d'antennes très marqué. Les mesures ont été faites avec une séparation de 0,5 m entre les antennes.

La seconde série d'enregistrement a aussi été effectuée sur le front de taille, un mois après la première. Pendant ce mois, le front de taille avait progressé d'une trentaine de mètres, mais nous avons pu constater que l'induration argileuse était toujours apparente. Nous avons donc fait nos mesures au-dessus de cette induration.

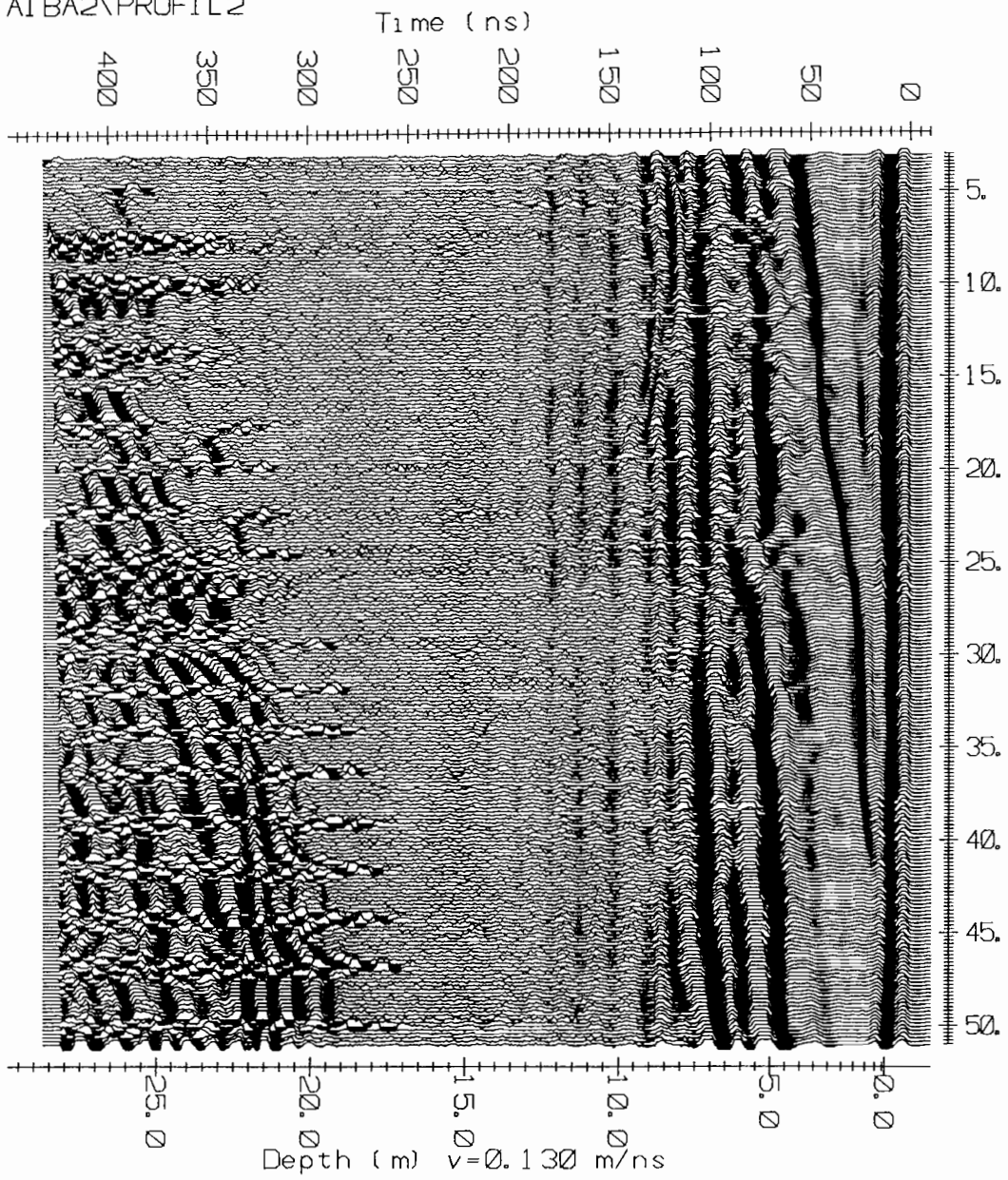
EKKO\TAI BA2\CMP200



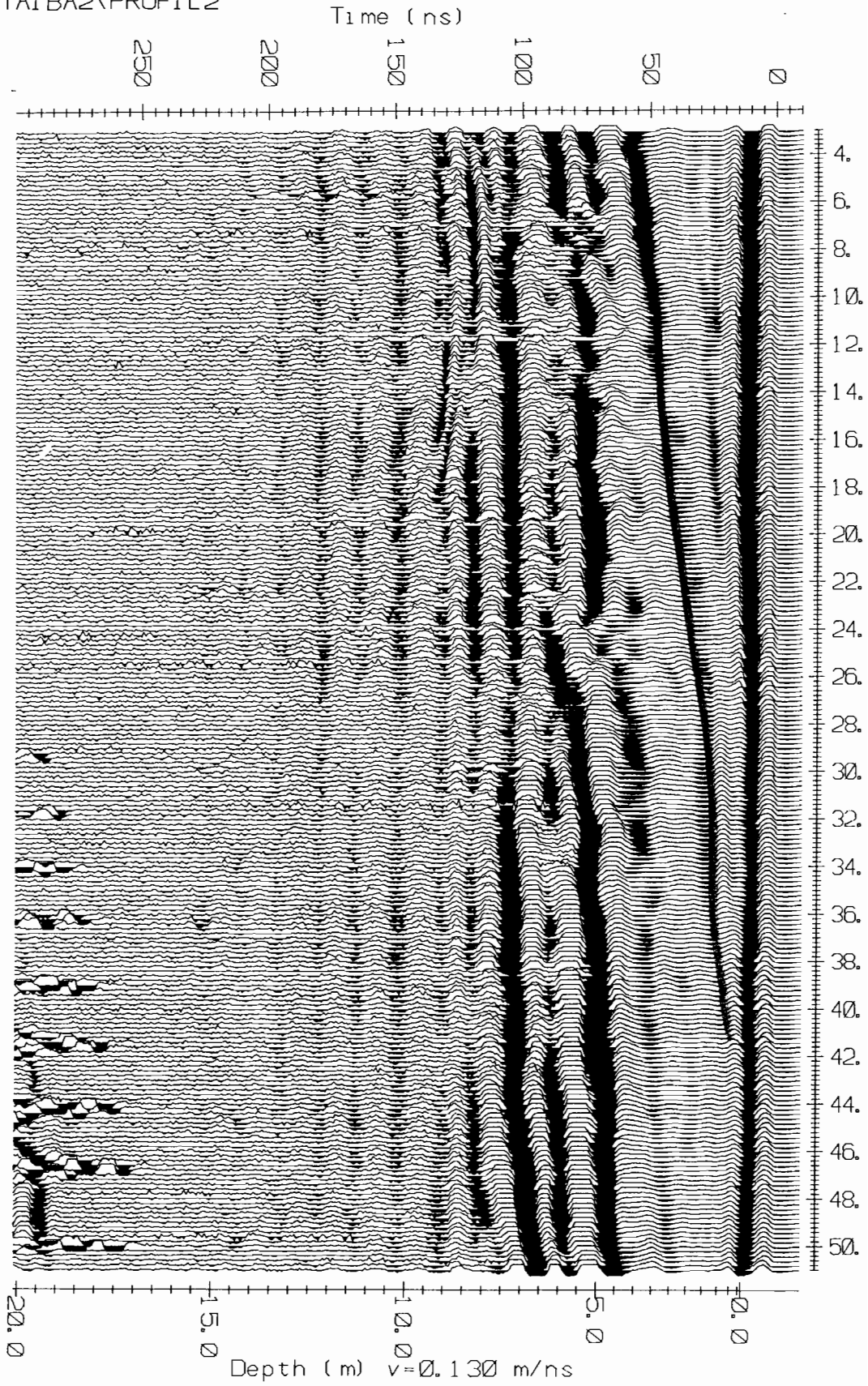
EKKO\TAI BA2\PRO1



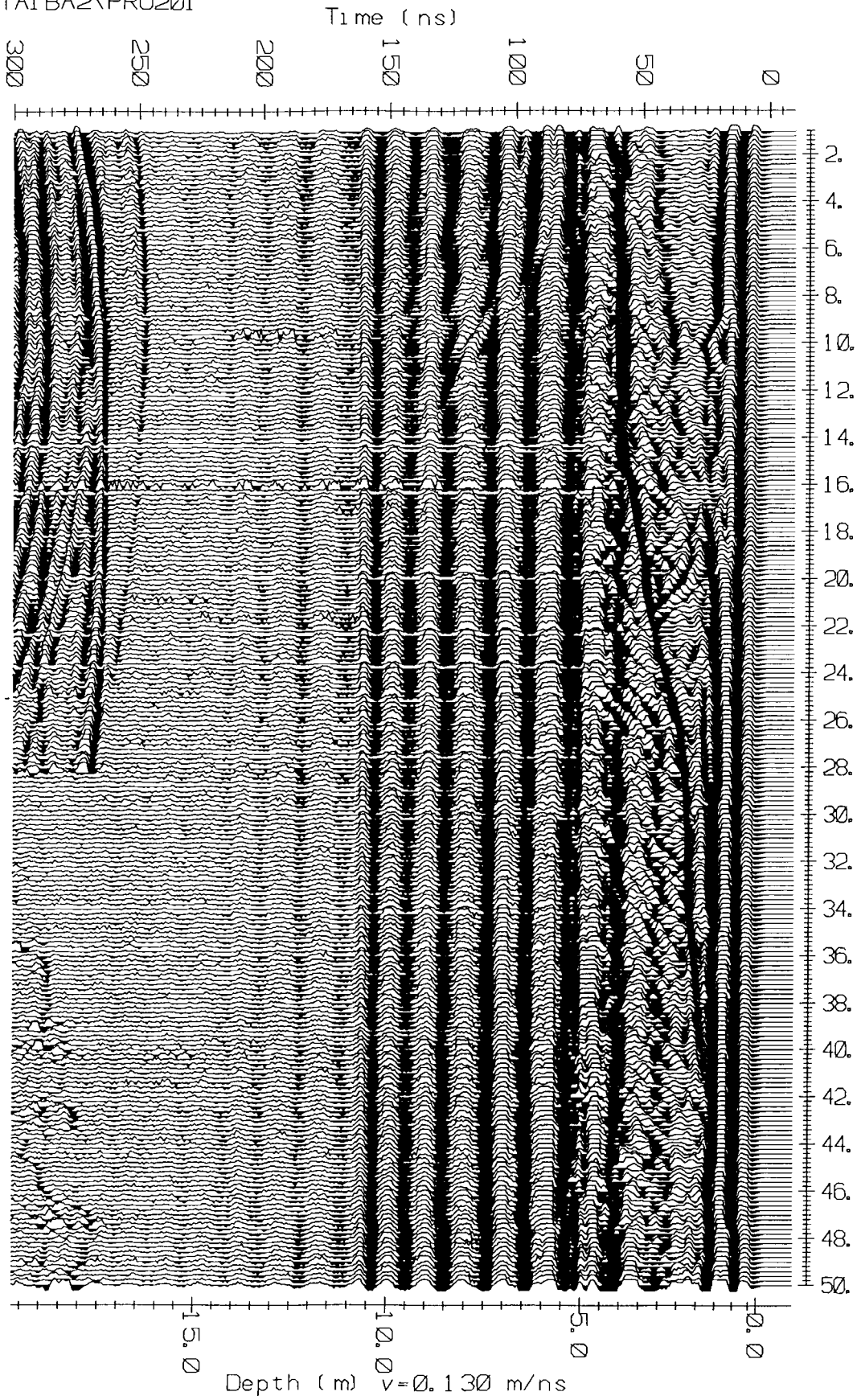
EKKO\TAI BA2\PROFIL 2

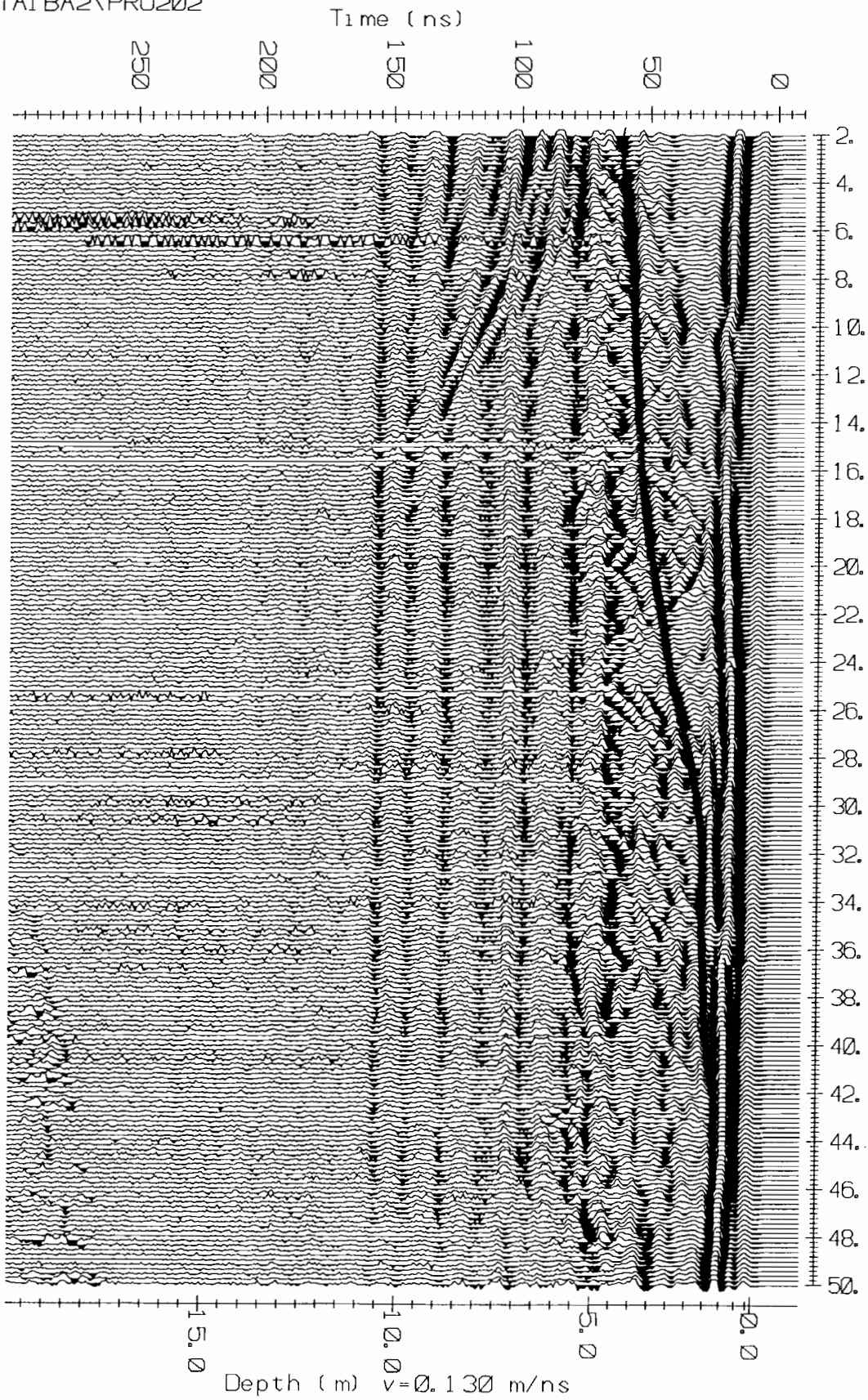


EKKO\TAI BA2\PROFIL 2

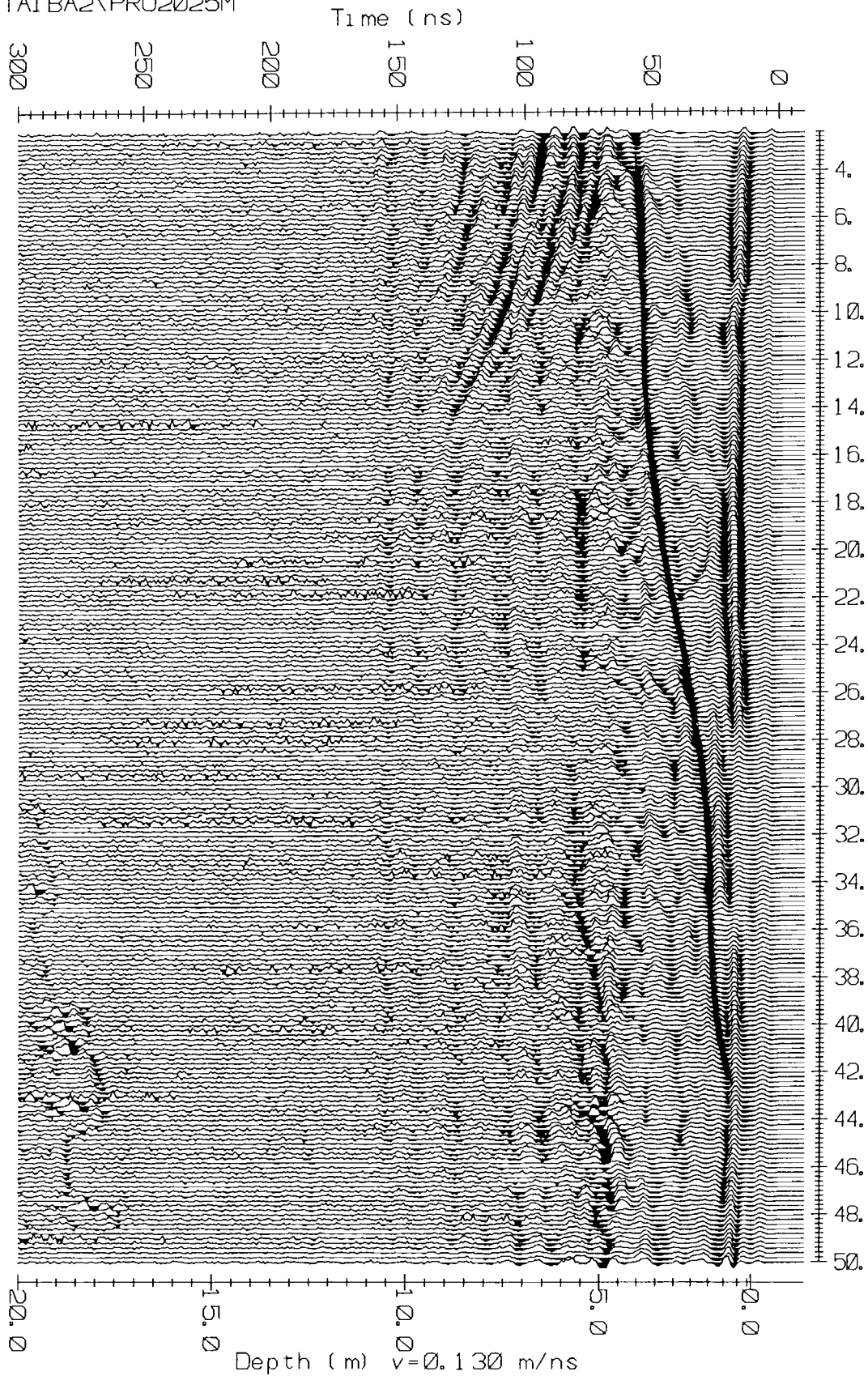


EKKO\TAI BA2\PRO201





EKKO\TAI BA2\PRO2025M



Les antennes de 100 MHz ont été utilisées pour les profils PR01 et PROFIL2. PR01 a été effectué à environ trois mètres du bord du talus, parallèlement à celui-ci ; PROFIL2 est parallèle à PR01, les deux profils sont séparés de deux mètres.

Le pas de mesure est 0,20 m et la séparation des antennes de 3 m.

Les enregistrements CMP200, PR0201, PR0202 et PR02025M ont été réalisés avec les antennes de 200 MHz, au même endroit que PROFIL2.

Le pas de mesure est aussi 0,20 m mais la séparation des antennes varie d'un profil à l'autre : 1 m pour PR0201, 2 m pour PR0202, 2,50 m pour PR02025M. On peut ainsi constater l'atténuation du couplage d'antennes lorsqu'elles sont de plus en plus éloignées.

Sur le CMP200, on mesure une vitesse de 0,13 m/ns, ce qui permet de convertir les temps en profondeurs ; on peut aussi voir un premier réflecteur sous la forme d'une hyperbole qui commence à 50 ns.

On retrouve ce réflecteur sur tous les enregistrements, à 50 ns, au début du profil, et qui remonte à la surface vers la position 35 m. Avec cette hypothèse de vitesse, le réflecteur est à 3,25 m de profondeur au début du profil.

Il peut s'agir de l'induration au-dessus de laquelle nous avons travaillé. Dans ce cas, cela signifierait que le contraste de constante diélectrique entre l'induration argileuse et le sable est plus important que lors de notre première mission où le radar n'avait pas détecté l'argile indurée.

L'induration est surmontée par du sable ; sur les enregistrements, on peut voir des ondulations. Celles-ci peuvent être l'image de la sédimentation du sable.

N'ayant pas eu d'informations géologiques très précises, il nous est difficile de conclure d'une façon définitive. Mais les résultats que nous exposons sont parfaitement compatibles avec la géologie connue.

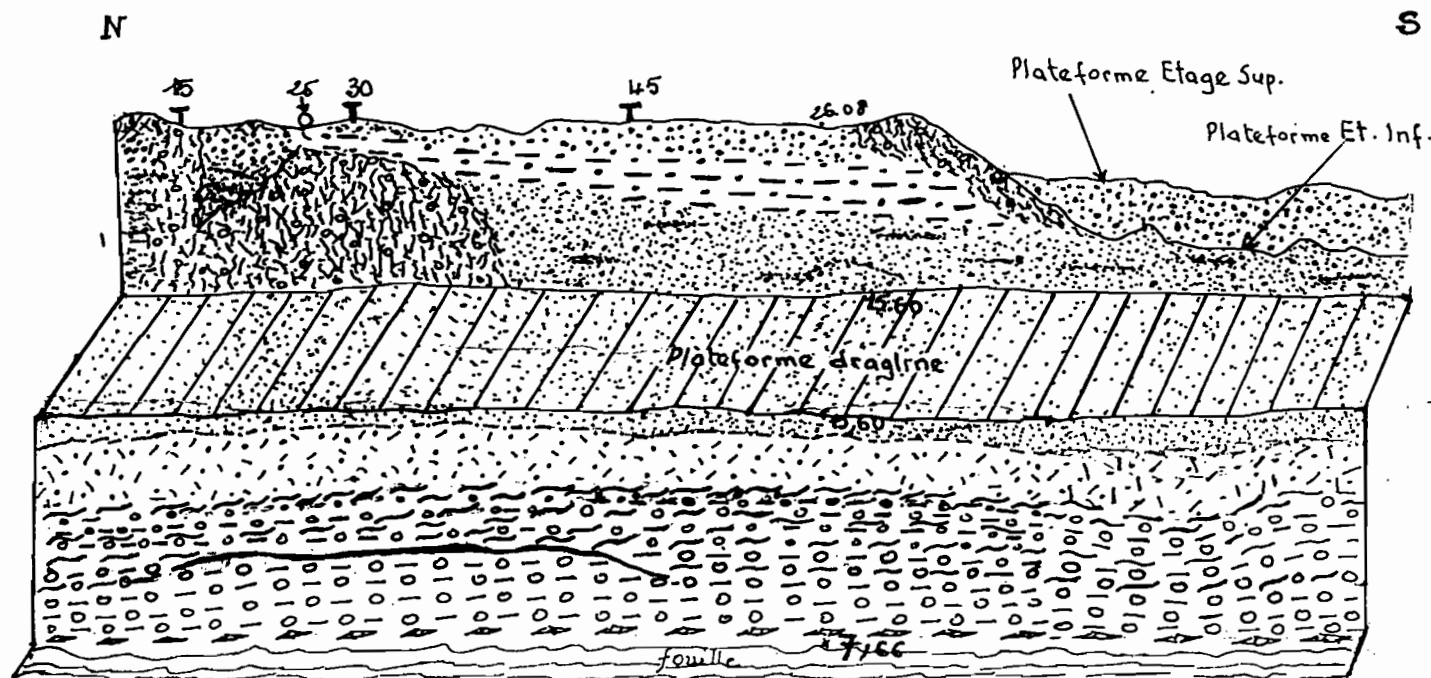
Sur les sections, on ne voit plus d'information en dessous de 100 ns.


Ces enregistrements ont été faits à proximité d'une drag-line, c'est pourquoi on peut voir des signaux dans le bas des sections : les ondes émises dans l'air se sont réfléchies sur la drag-line puis ont été enregistrées par le récepteur.

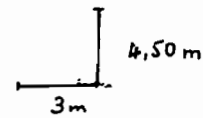
De même, au début des profils, apparaît une sorte de dôme à 100 ns, sans doute dû à un objet métallique proche des points de mesures.

La dernière série d'enregistrements réalisés au front de taille a été effectuée sur la plateforme où se trouvent les drag-lines, avec les antennes de 200 MHz.

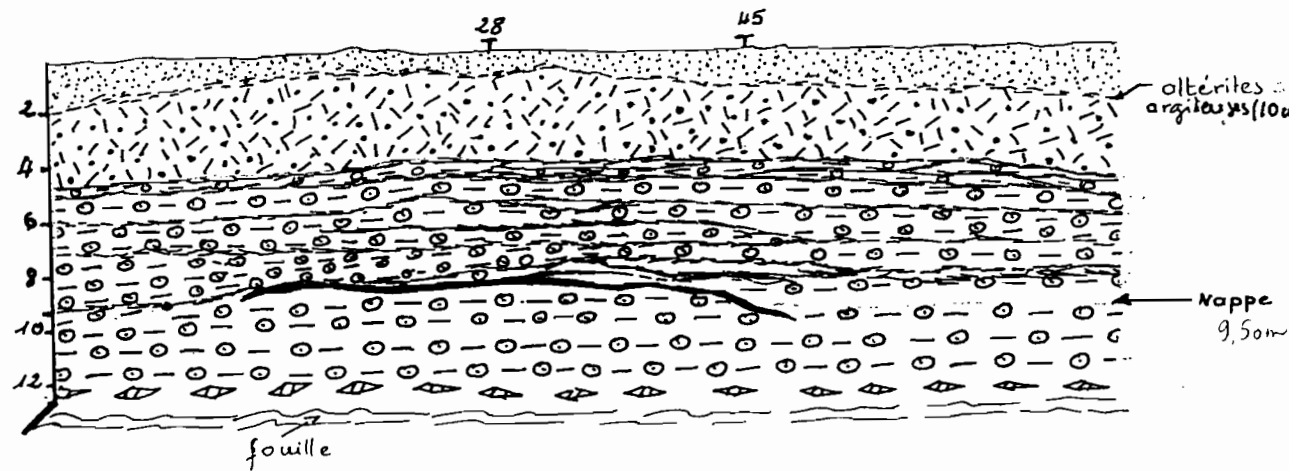
COUPE N° 1









-  Lit d'argile brune à noir-verdâtre
-  Phosphate + lits d'argiles brunes altérées
-  Grès gris silico-ferrallitique
-  Sable arénitique meuble
-  Sable argilo-pelitique induré
-  Sable silto-arénitique meuble
-  Dépôts d'altérites quartzo-phosphatées

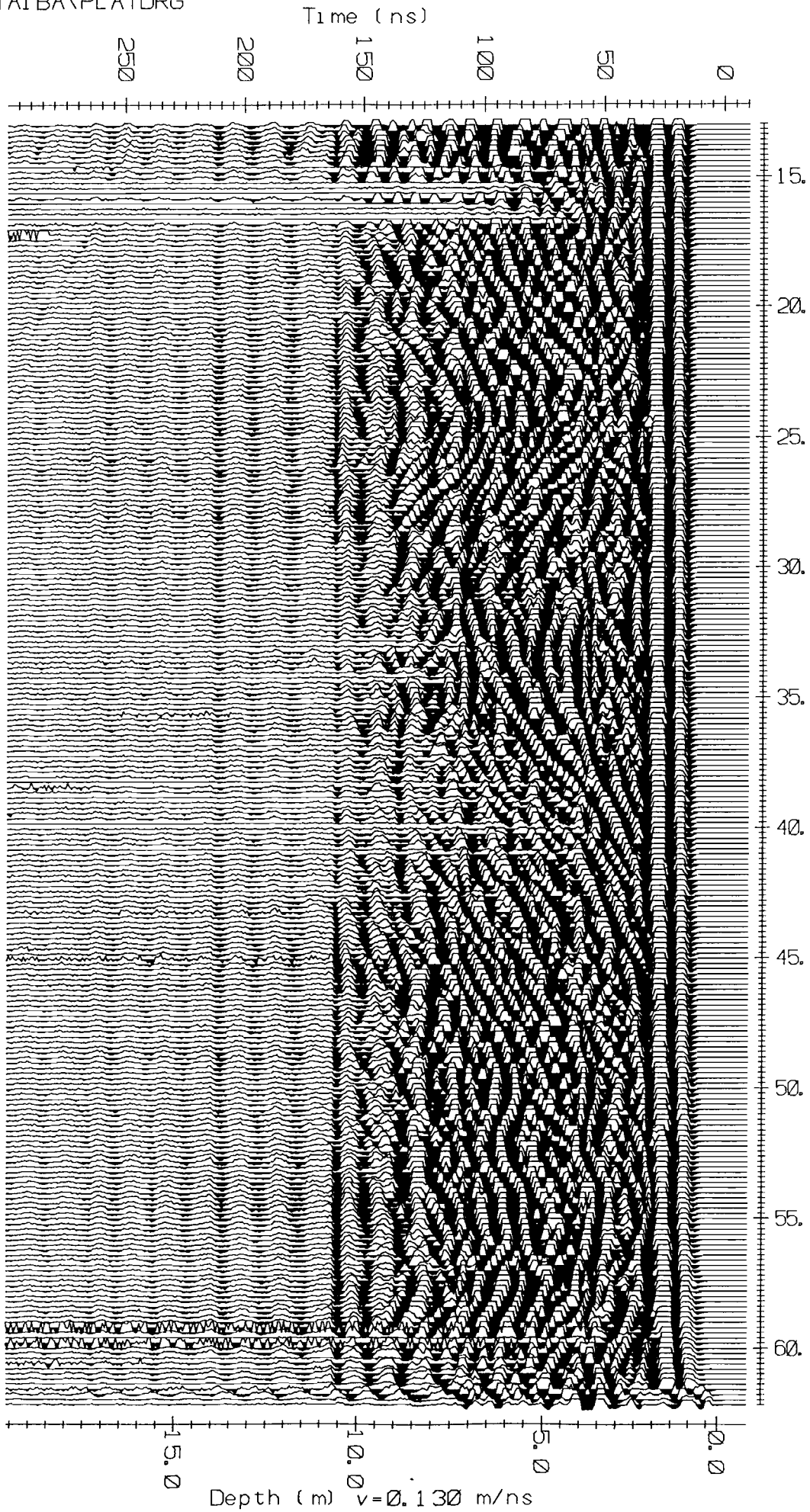


COUPE N° 2



-  Sable aréno-silteux grisâtre meuble
-  Grès gris silico-ferrallitique
-  Phosphate + lits d'argiles brunes altérées
-  Oopelphospharénolite
-  Phosphate induré
-  Lits d'argile brune à noir-verdâtre

EKKO\TAI BA\PLA TDRG



On peut voir sur cette section la stratification des niveaux géologiques. La coupe dessinée par le géologue ne les montre pas avec autant de détails car ces niveaux étaient masqués par une sorte de placage uniforme qui empêchait toute observation. Cependant, cette interprétation est compatible avec le processus de sédimentation en chenaux des sables surmontant le phosphate.

On observe que le signal est arrêté par un niveau horizontal sur toute la section. Ce niveau peut être la nappe phréatique, qui atténue la propagation des ondes.

La profondeur de la nappe ayant été mesurée à 9,50 m en dessous du niveau où les mesures ont été faites, on en déduit une vitesse de 0,13 m/ns en moyenne dans ces sables et argiles, ce qui est compatible avec des sables secs.

IV.1.3.2. Tranchée de Tobène.

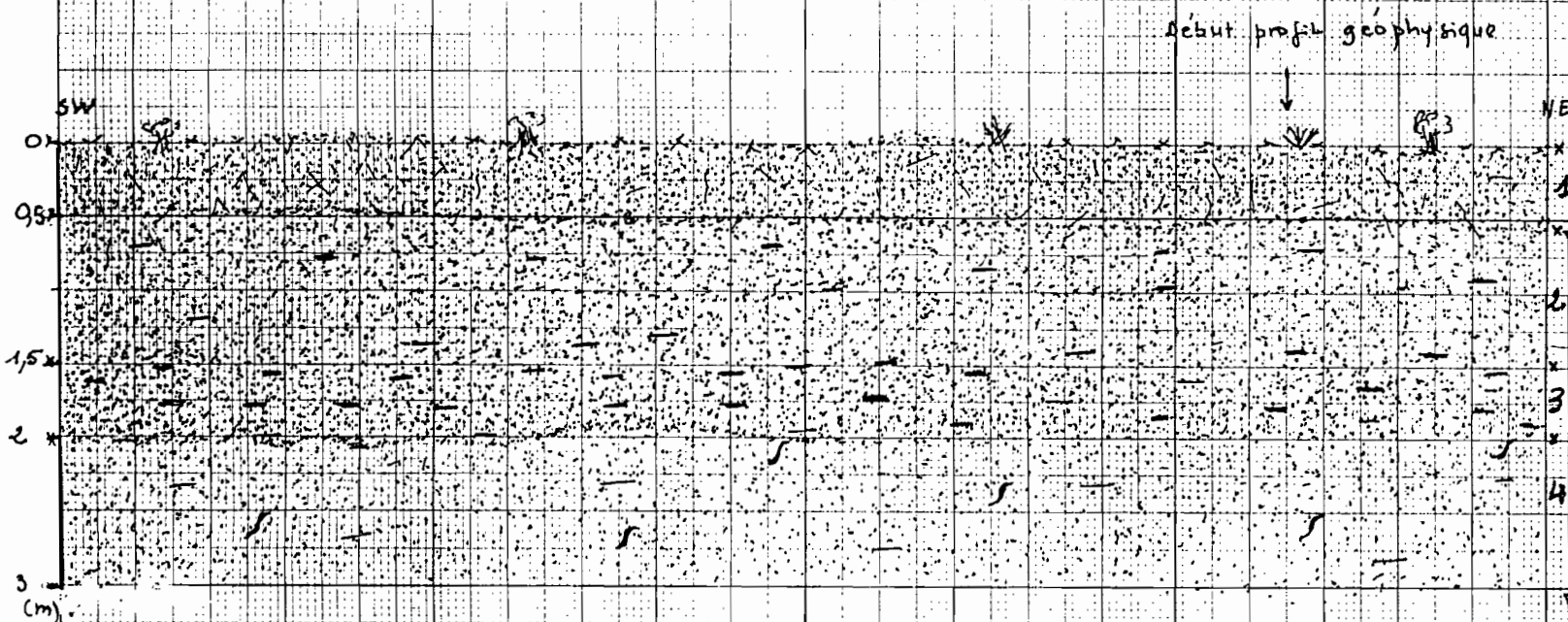
IV.1.3.2.1. Situation des profils et coupe géologique.

La coupe donne peu de détails quant aux structures que l'on peut rencontrer à côté de la tranchée Béchon à Tobène. D'autre part, elle s'arrête à trois mètres de profondeur, au fond de la tranchée, ce qui est trop peu pour l'investigation par le radar à 100 et 200 MHz.

Le niveau à mettre en évidence avec le radar est constitué de sables consolidés qui commencent à deux mètres de profondeur.

Les antennes de 200 MHz ont été utilisées pour les profils B200 et B201. B200 a été réalisé à deux mètres du bord de la tranchée, parallèlement à celui-ci ; B201 est parallèle à B200, à une distance d'un mètre. Le pas de mesure est 0,20 m et la séparation des antennes 1,20 m.

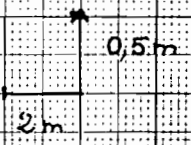
Coupe TRANCHEE BECHON



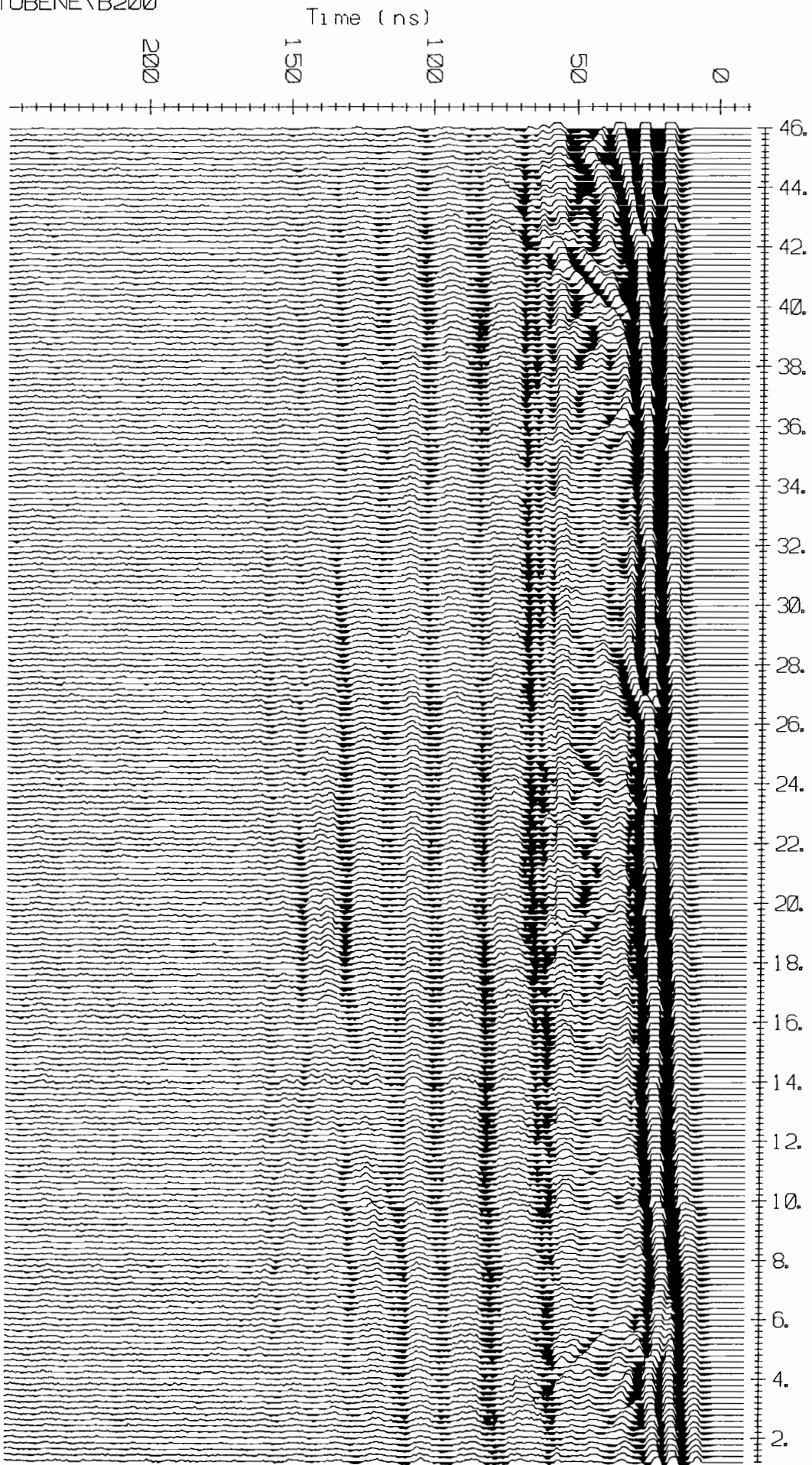
Début profil géophysique

- 1 - Sable silto-arenitique brun orangé humifère
- 2 - Sable gris-verdâtre silto-arenitique, légèrement argileux et finement poreux. Consolidé
- 3 - Idem, verdâtre + mouchetures ferrugineuses, moins poreux et plus dur
- 4 - Idem, rouge vif tacheté de gris-vert, porosité plus prononcée

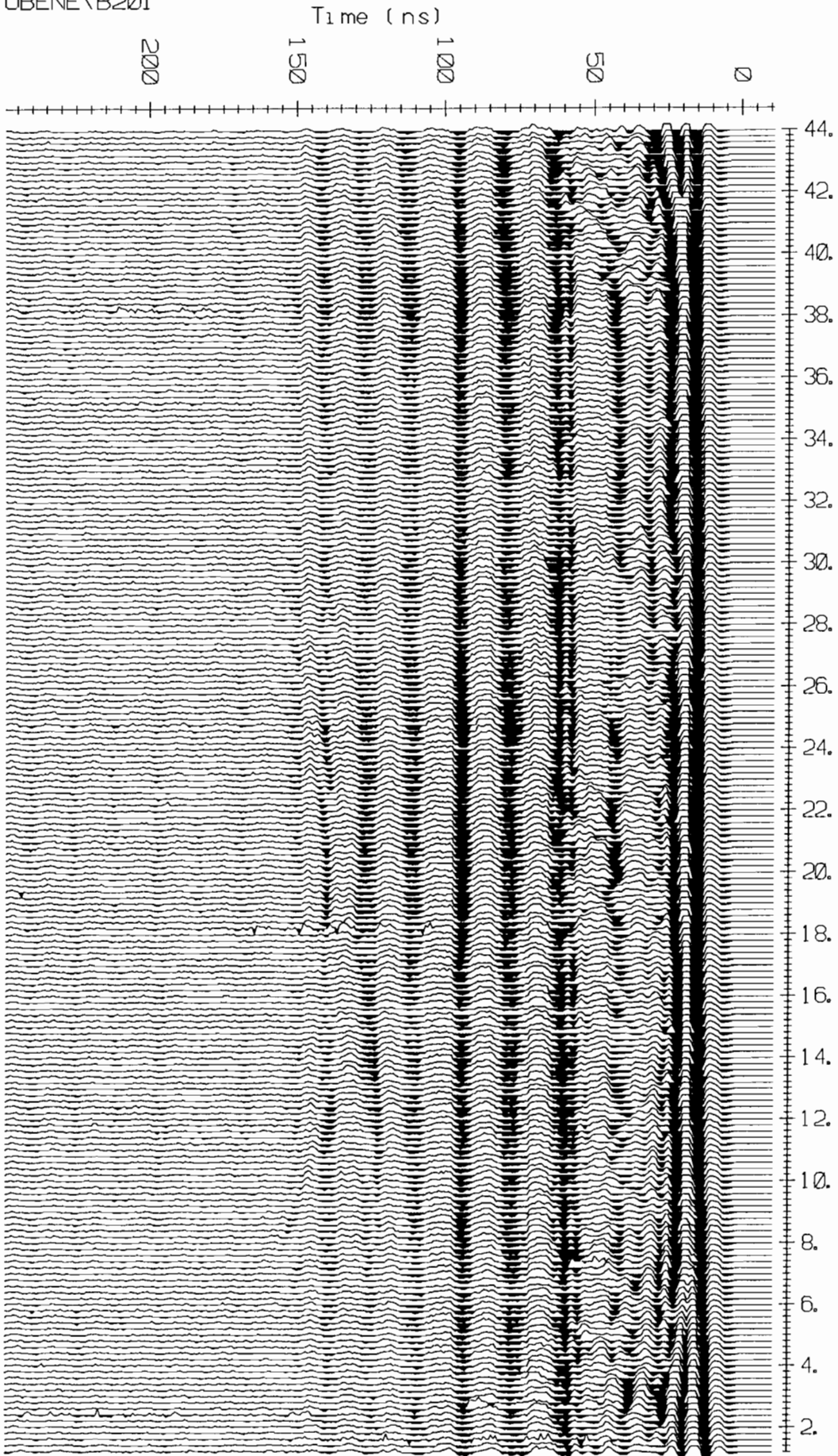
Passage verticale de faciès



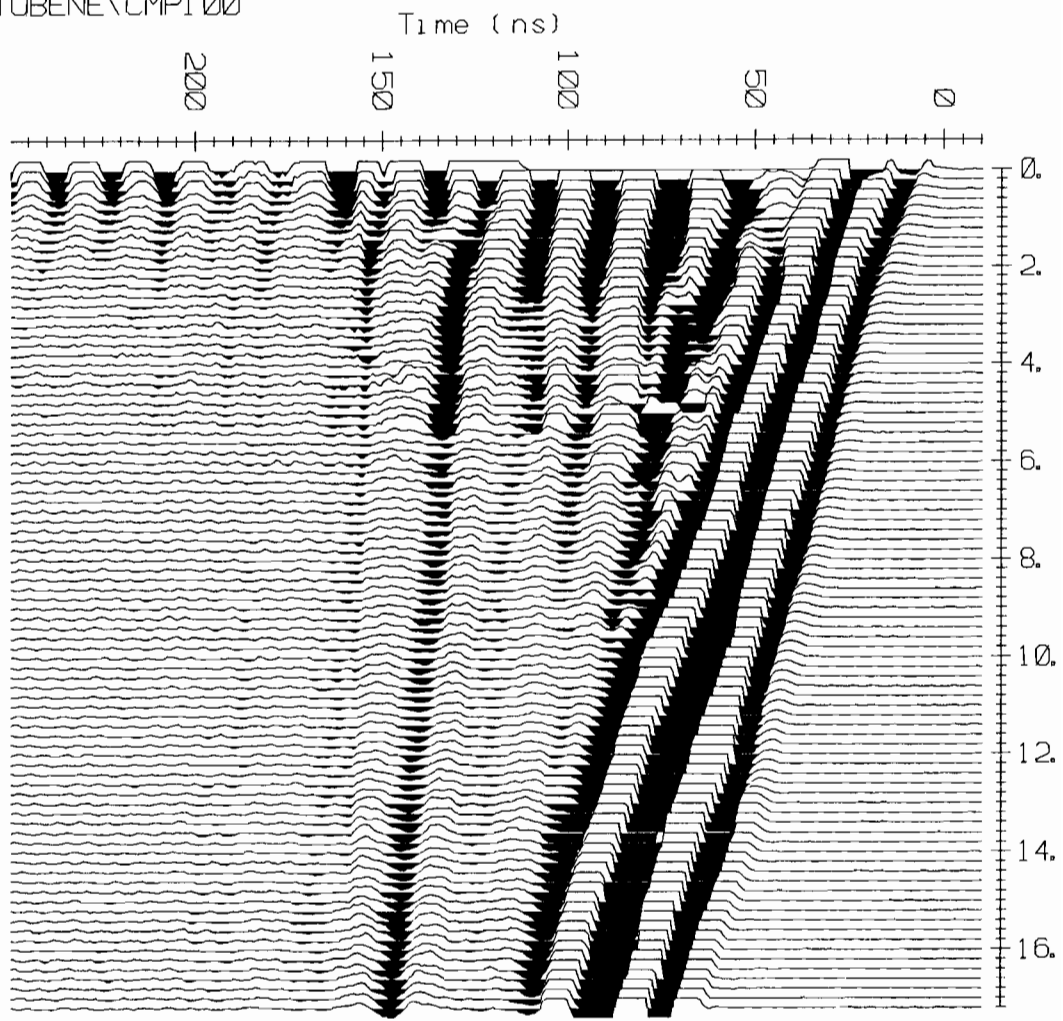
EKKON\TOBENE\B200



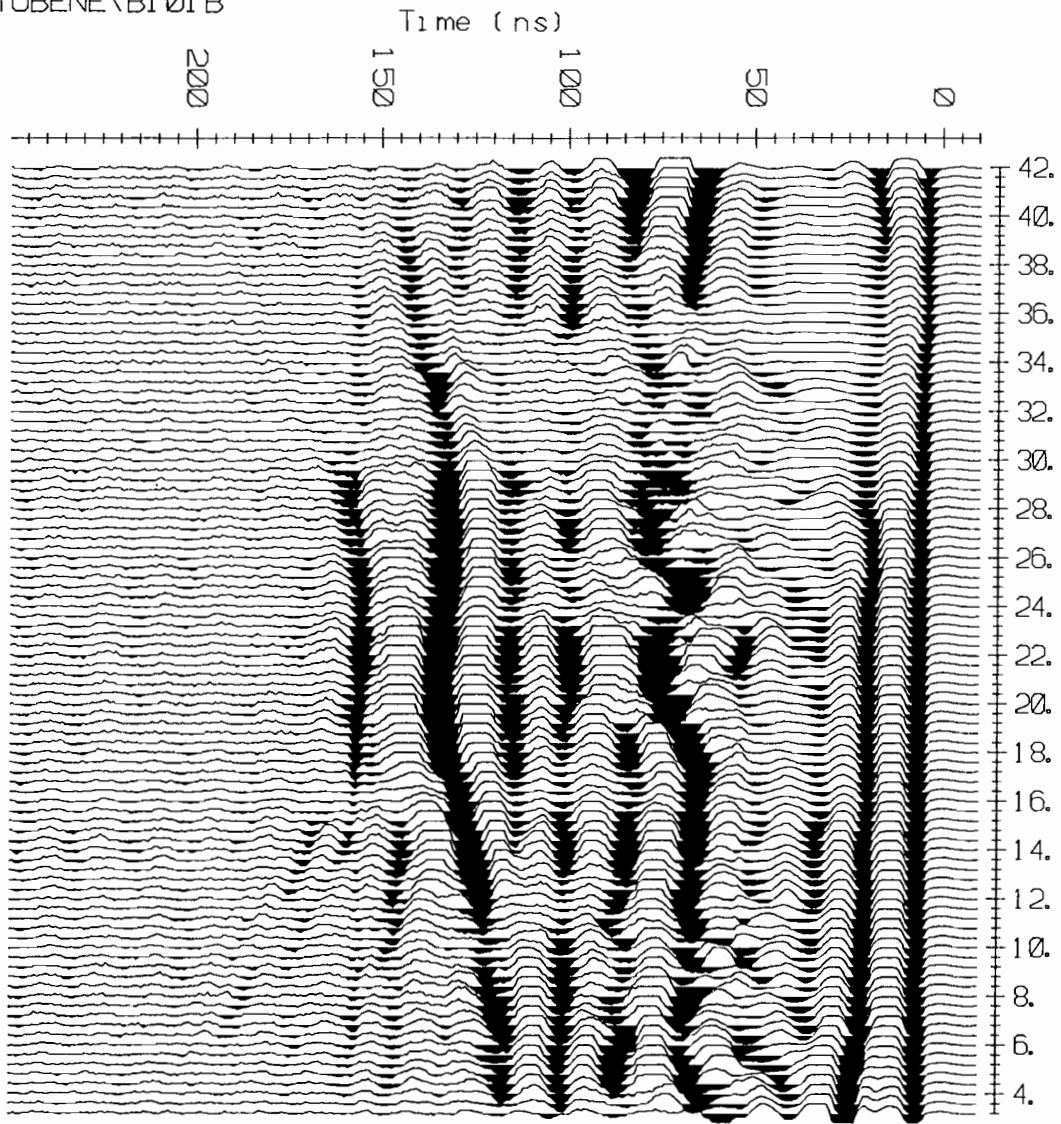
EKKON\TOBENE\B201



EKKO\TOBENE\CMP100



EKKO\TOBENE\B1 Ø1 B



Les enregistrements B101B et CMP100 ont été réalisés avec les antennes de 100 MHz, au même endroit que B201. Le pas de mesure est 0,40 m, l'espacement entre les antennes est 3 m pour B101B.

IV.1.3.2.2. Interprétation.

On voit dans les cinquante premières nanosecondes des ondulations que nous ne pouvons pas expliquer parce que la coupe géologique n'indique pas de changements de terrains ni de structures dans ceux-ci.

Le CMP100 ne permet pas de calculer la vitesse des ondes dans le sol donc il n'est pas possible de connaître la profondeur et l'épaisseur des ondulations observées.

On peut aussi voir une hyperbole très large à 150 ns de profondeur, entre les positions 12 et 22 m ; elle peut être due à la voiture, située à une vingtaine de mètres du profil, latéralement.

Cependant, on ne voit pas beaucoup de choses intéressantes sur ces sections. Cela est dû à la nature des terrains : il ne semble pas y avoir un contraste des constantes diélectriques suffisamment important pour que l'on puisse distinguer les différents niveaux observés par le géologue. D'autre part, la fréquence des antennes n'est pas assez élevée pour obtenir le détail des premiers mètres : à 200 MHz, l'impulsion d'émission dure 5 ns. Si elle est un peu déformée, sa largeur est de 10 ns, ce qui correspond à une épaisseur de terrain de cinquante centimètres avec une vitesse de 0,10 m/ns. Cela explique pourquoi il est impossible d'avoir des sections très détaillées avec cette fréquence d'antennes.

Pour obtenir plus de détail, il faudrait utiliser des antennes de plus hautes fréquences, ce qui permettrait d'augmenter le pouvoir de séparation.

IV.1.3.3.Tranchée de Gade.

IV.1.3.3.1.Situation des profils et coupe géologique.

Au sud-ouest de la tranchée, 90 cm de sable recouvrent des latérites horizontales, dont on ne connaît pas l'épaisseur.

Au nord-ouest, le contact sable/latérites est aussi horizontal mais le sol ne l'est pas : au début du profil, les latérites sont à environ deux mètres de profondeur tandis qu'à la fin du profil, les antennes étaient posées sur les latérites.

Nous avons effectué des mesures avec les antennes de 200 MHz, afin d'obtenir une résolution maximale sur les premiers mètres de profondeur.

IV.1.3.3.2.Interprétation.

Le CMP effectué au SW de la tranchée, CMPGADSW, permet de calculer une vitesse de 0,13 m/ns dans le premier terrain.

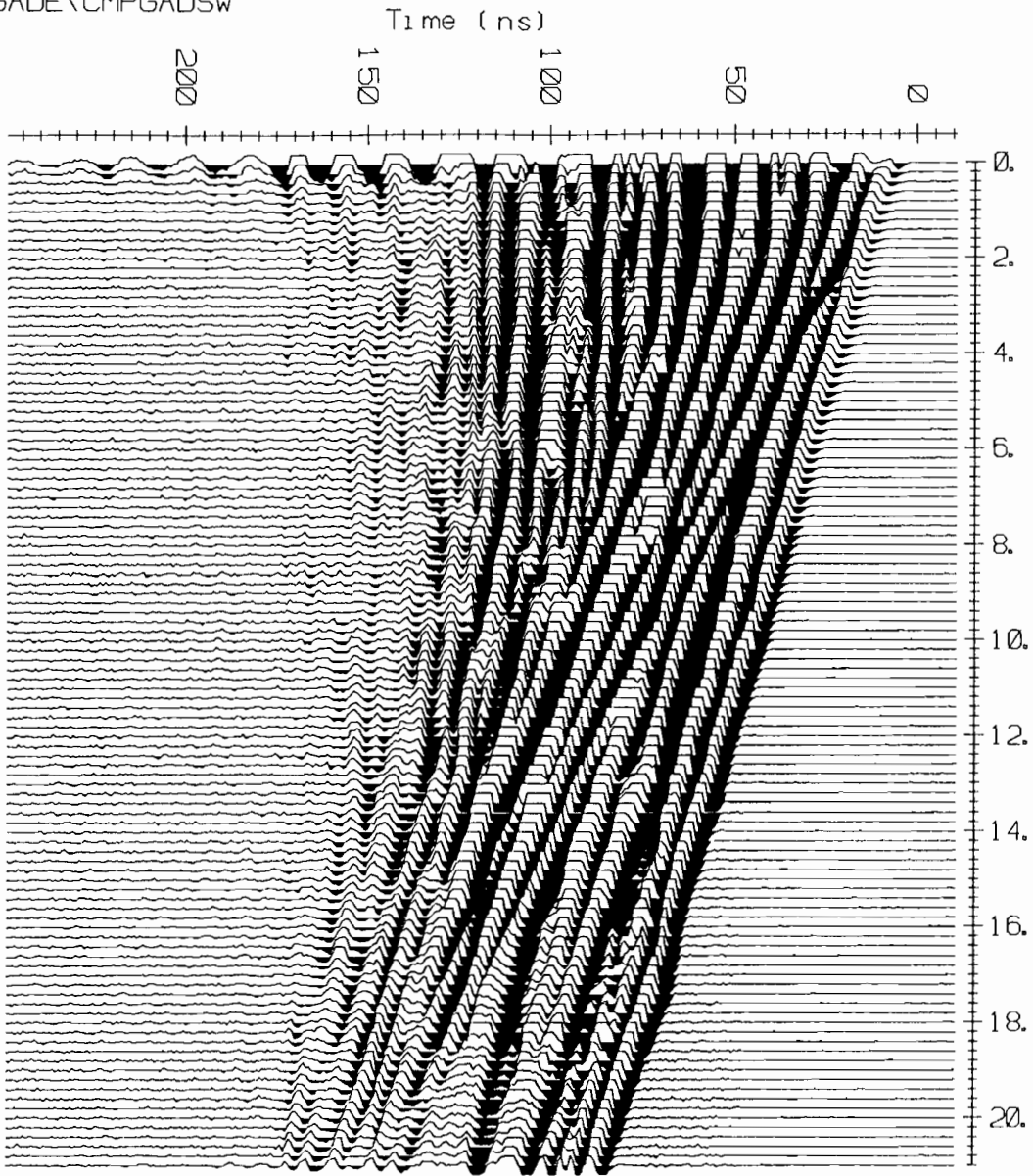
Sur l'enregistrement GADSW2M, fait au même endroit que le CMP, on peut voir l'interface sable/latérites mais l'onde directe dans le sol et la première réflexion arrivent au même moment, ce qui empêche de distinguer ces deux ondes. L'interface est trop proche de la surface pour pouvoir être correctement suivie.

En dessous, les latérites apparaissent comme un milieu peu homogène. Cette inhomogénéité peut être d'origine structurale ou d'origine chimique : la teneur en oxyde de fer peut varier par exemple.

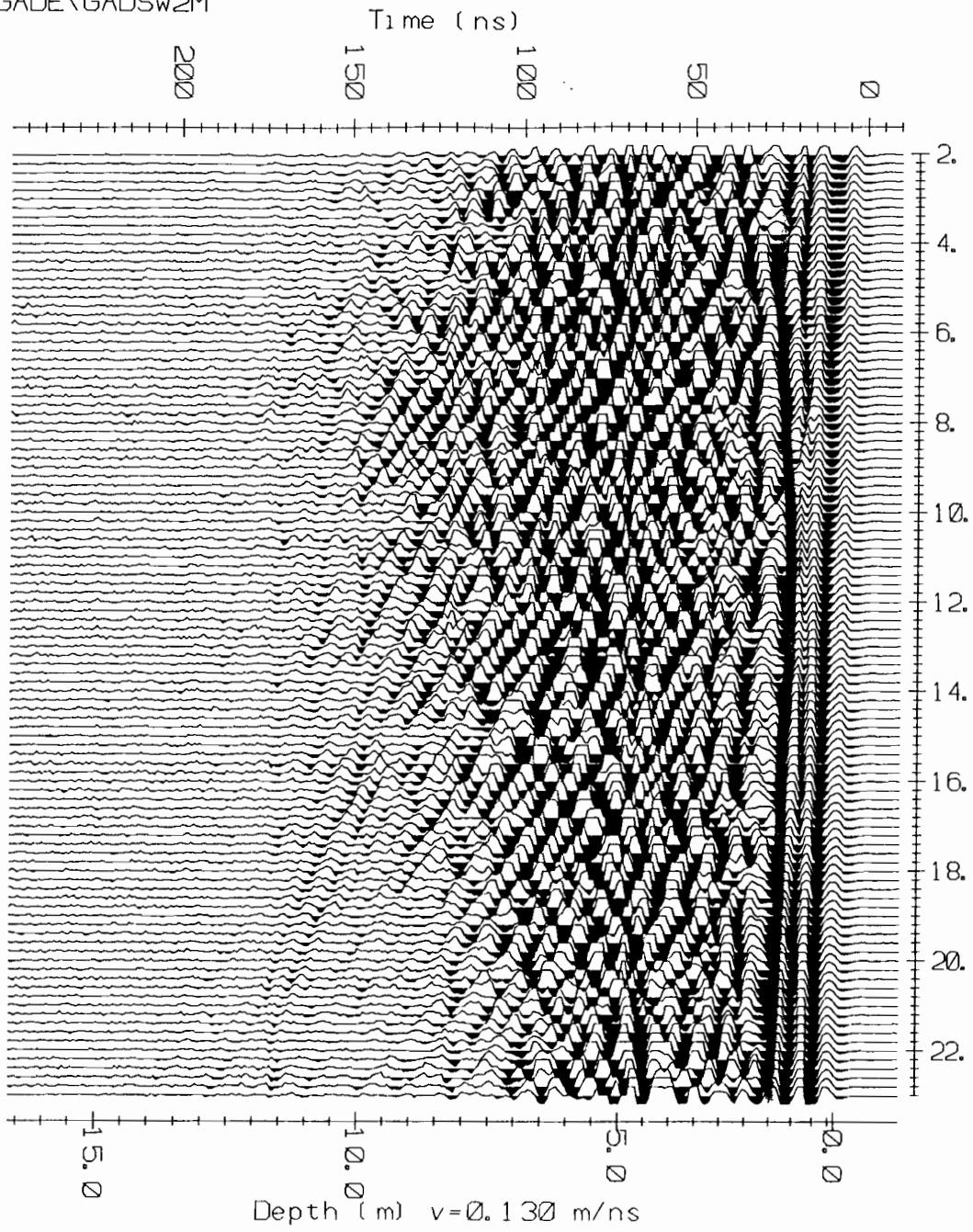
Sur la section qui a été faite au NE de la tranchée, on voit l'interface sable/latérites horizontale lorsque la topographie est introduite.

En dessous, les mêmes structures apparaissent. On peut observer des niveaux assez pentus.

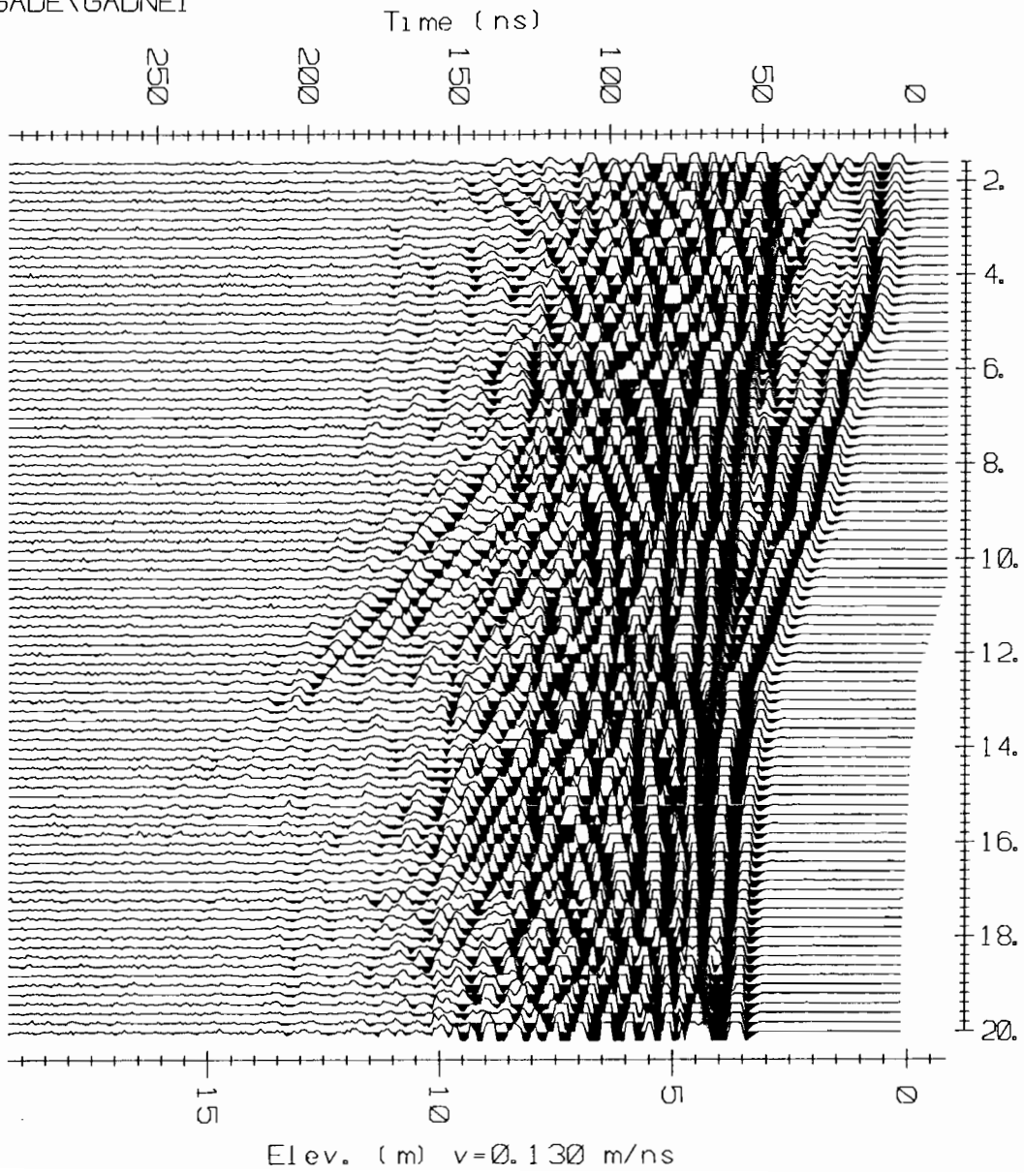
EKKO\GADE\CMPGADSW



EKKO\GADE\GADSW2M



EKKO\GADE\GADNE1



IV.1.4. Conclusion.

Au vu de nos enregistrements, il apparaît donc que les indurations sont mal visibles en radar. Même sur le front de taille, l'induration ne constitue pas un réflecteur très marqué.

Le contraste de teneur en eau entre le sable encaissant et l'induration argileuse est probablement insuffisant.

D'autre part, il semble que le premier niveau de la tranchée de Tobène "retienne" les ondes, ce qui provoque une atténuation des ondes. Il est possible que cela fasse écran à des couches plus profondes.

Pour compléter ces expérimentations, il serait intéressant de réaliser des profils dans des zones où l'on sait que l'induration s'arrête, afin de savoir si le radar permet de distinguer l'encaissant des indurations et des latérites.

IV.2.Détection et structures de filons de quartz au Sénégal oriental.

IV.2.1.Introduction.

Les objectifs de cette mission étaient d'une part la reconnaissance de fractures aquifères, d'autre part la détection de filons de quartz. Nous devions travailler sur un site minier parfaitement connu grâce à des forages ; malheureusement, nous n'avons pas pu accéder au site, faute d'autorisations.

Nous avons donc travaillé à côté, sur des filons de quartz, mais nous n'avons pas pu tester la capacité du radar à détecter les zones de fractures.

IV.2.2.Travaux effectués.

Nous avons tout d'abord travaillé sur un filon de quartz affleurant puis sur un filon sous une couverture, afin de constater si le radar différencie le quartz de l'encaissant. Nous avons aussi effectué des mesures sur un talus de route qui constituait une excellente coupe géologique.

Sur ces deux sites, les deux fréquences d'antennes ont été utilisées.

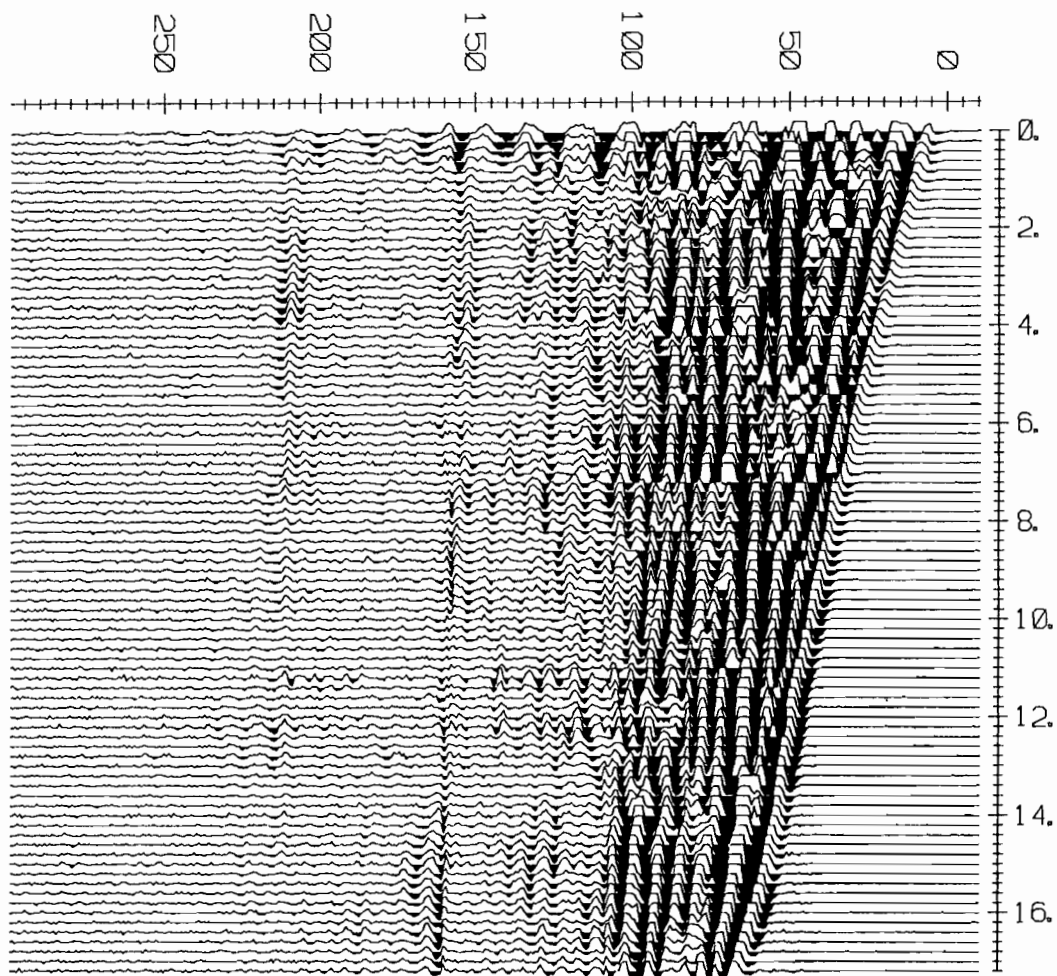
IV.2.3.Résultats.

IV.2.3.1.Filons de quartz.

Les premiers enregistrements ont été faits avec les antennes de 200 MHz sur une colline où des filons de quartz affleuraient, l'encaissant étant volcano-sédimentaire.

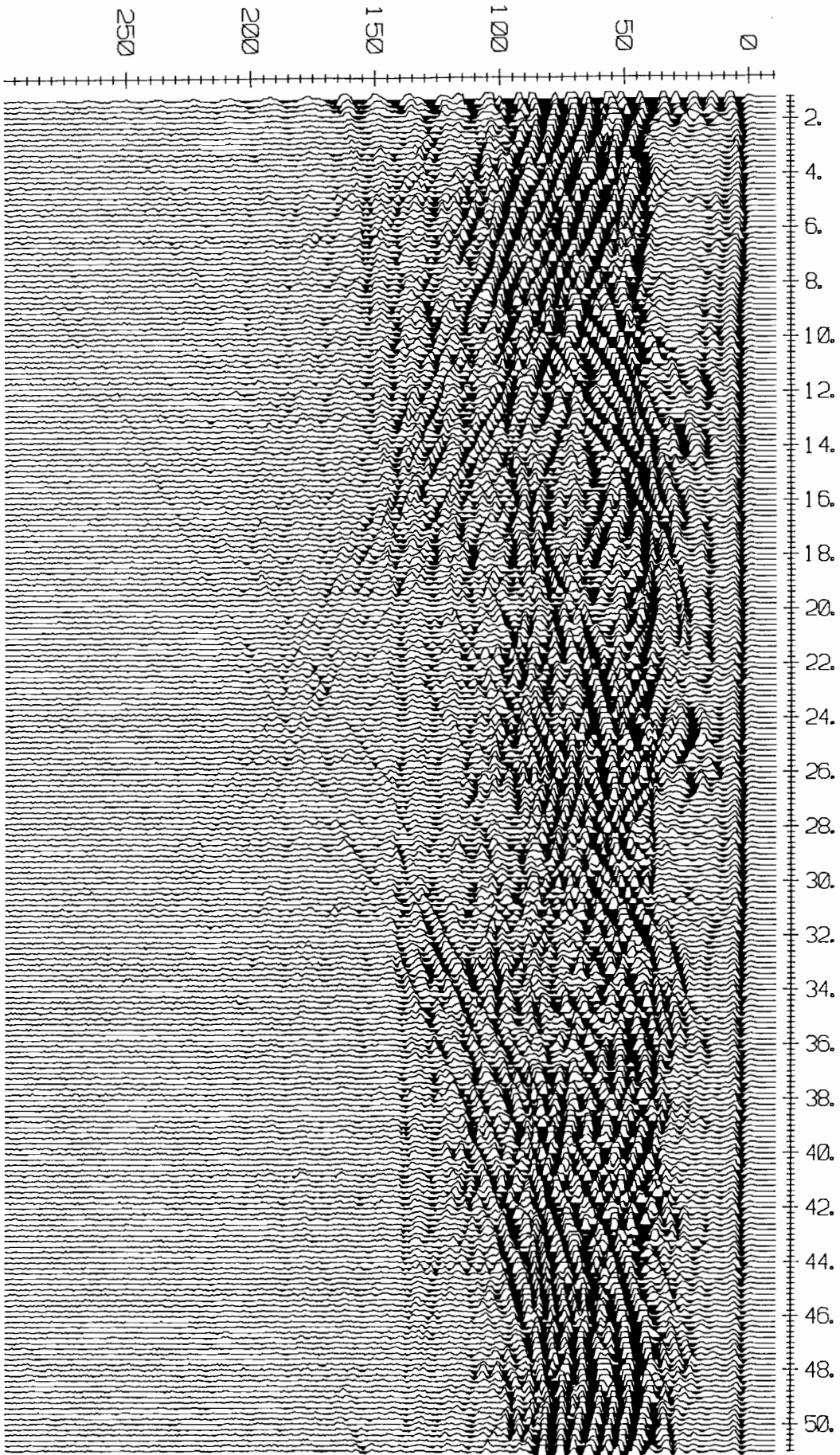
EKKO\SABODAL A\SI T2\CMP1

Time (ns)

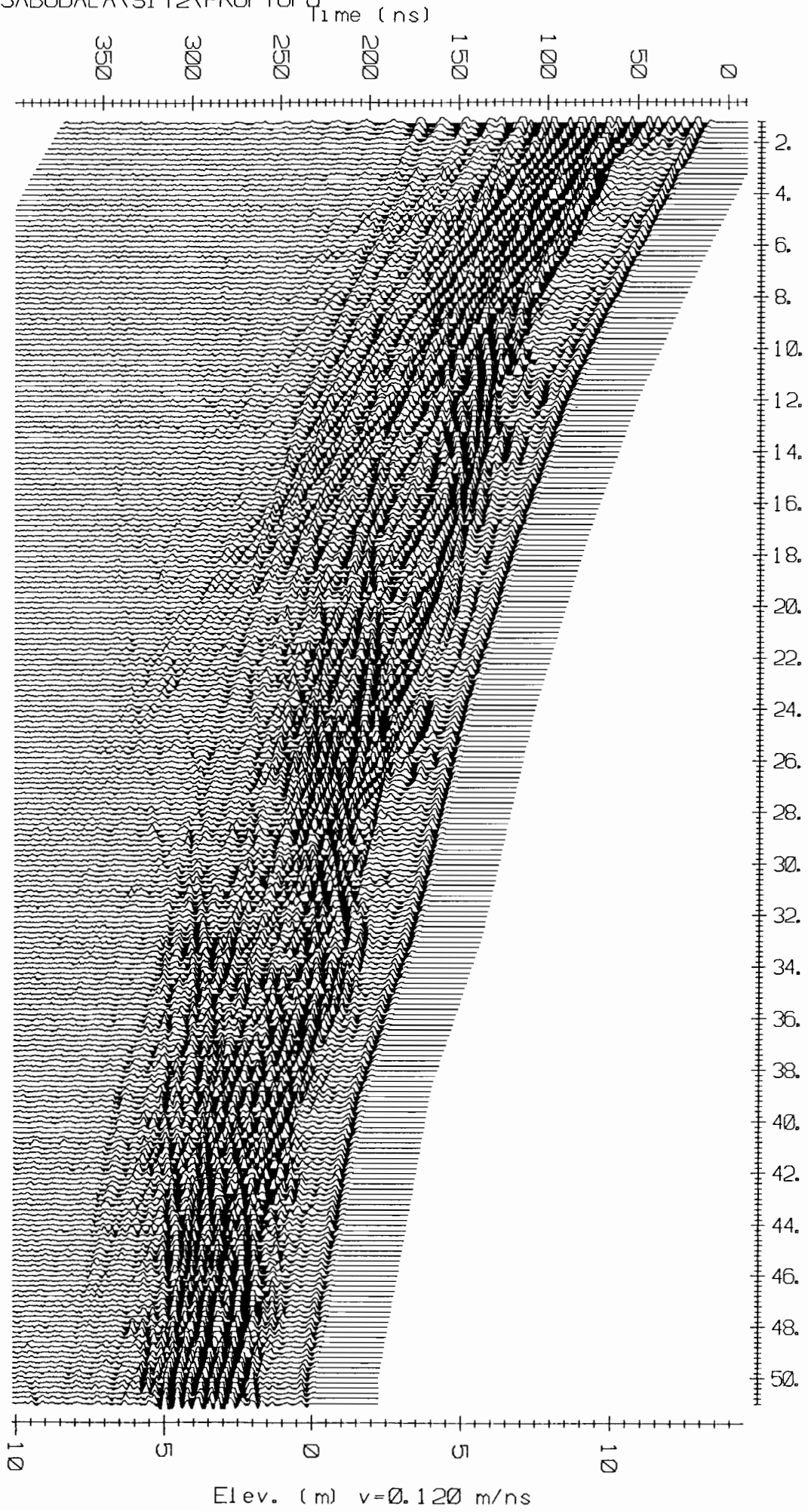


EKKO\SABODAL A\SI T2\PRO3

Time (ns)



EKKO\SABODAL A\SI T2\PROFTOPO



Le CMP (CMP1) que nous avons réalisé sur ce terrain n'est pas exploitable : on ne voit que l'onde directe dans l'air, pas l'onde directe dans le sol.

On peut voir sur le profil PR03 des structures en dôme, et certaines se prolongent très profondément. De plus, dans les premières nanosecondes, il n'apparaît pas beaucoup de signal.

PROFTOPO est le profil PR03 auquel la topographie a été ajoutée.

Au Sénégal oriental, l'altération peut atteindre dix à quinze mètres de profondeur. Il en résulte des matériaux complètement dégradés, à forte teneur en argiles.

D'autre part, de nombreuses fractures affectent les roches, saines ou altérées.

On peut supposer que l'altération des premiers mètres de profondeur a pour conséquence une uniformisation des terrains ; les altérites ainsi formées ne présentent pas de contraste de constantes diélectriques parce qu'elles sont très sèches. C'est pourquoi on ne voit pas de signal dans le haut de la section.

Le contact de la zone altérée avec la zone saine n'est pas forcément horizontal ; il peut onduler. C'est ce que nous constatons sur les enregistrements. A partir de ce niveau, nous voyons du signal sur l'enregistrement : les grandes structures peuvent être dues à la réflexion latérale des ondes sur des fractures ou sur un filon qui se prolonge en profondeur.

En l'absence d'informations géologiques plus précises, nous ne pouvons pas privilégier l'une ou l'autre des hypothèses concernant la nature de l'objet réfléchissant.

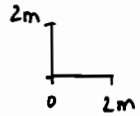
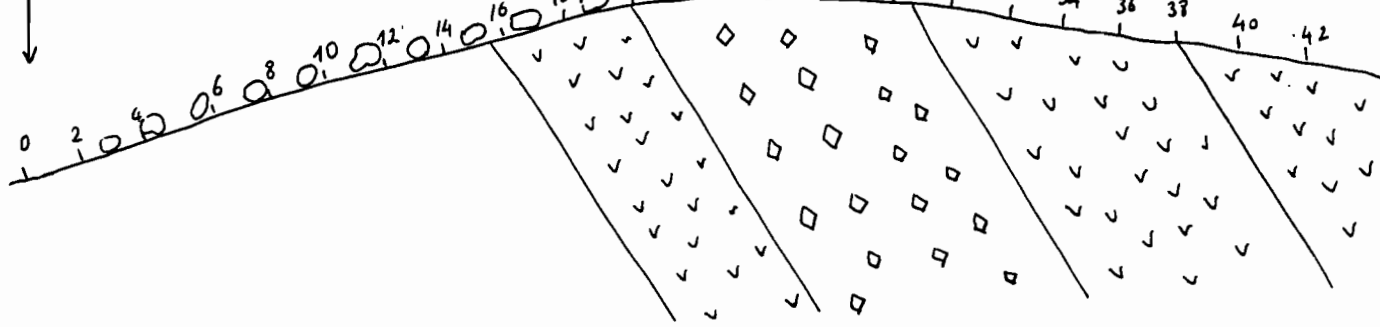
Les seconds enregistrements ont été réalisés sur un filon de quartz affleurant ; une tranchée avait été creusée, permettant de voir le pendage du filon.

Coupe géologique du filon de quartz, site n°4.

E

W

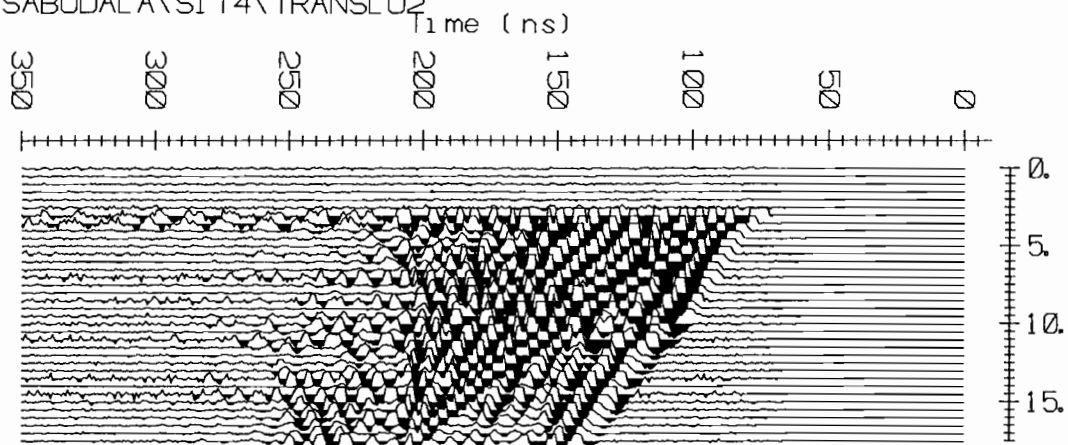
zéro du profil radar



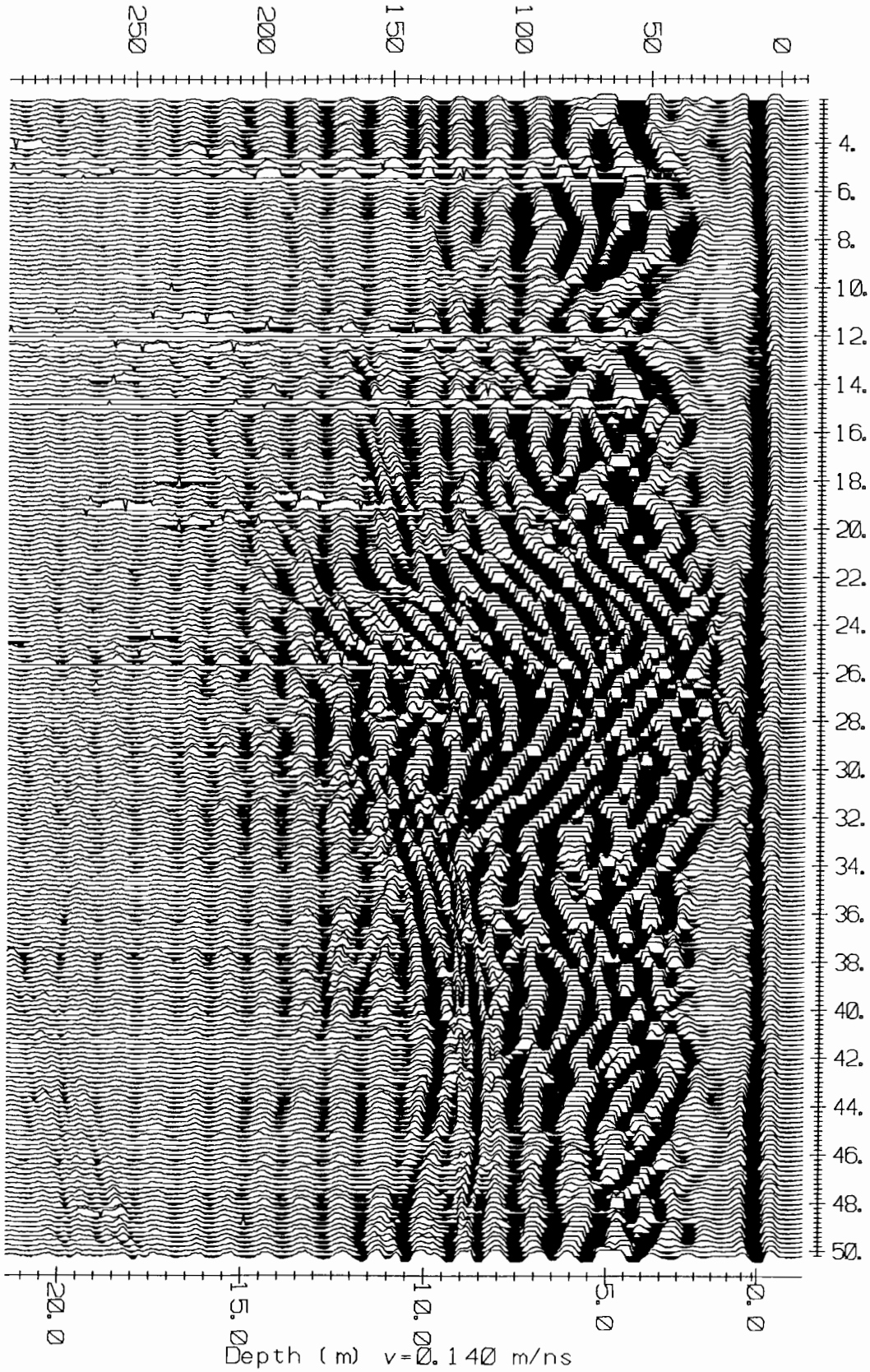
légende

- filon de quartz
- vv□ terrain volcano-sédimentaire
- vv□ volcano-sédimentaire structuré
- éboulis de quartz

EKKO\SABODAL A\SI T4\TRANSLU2



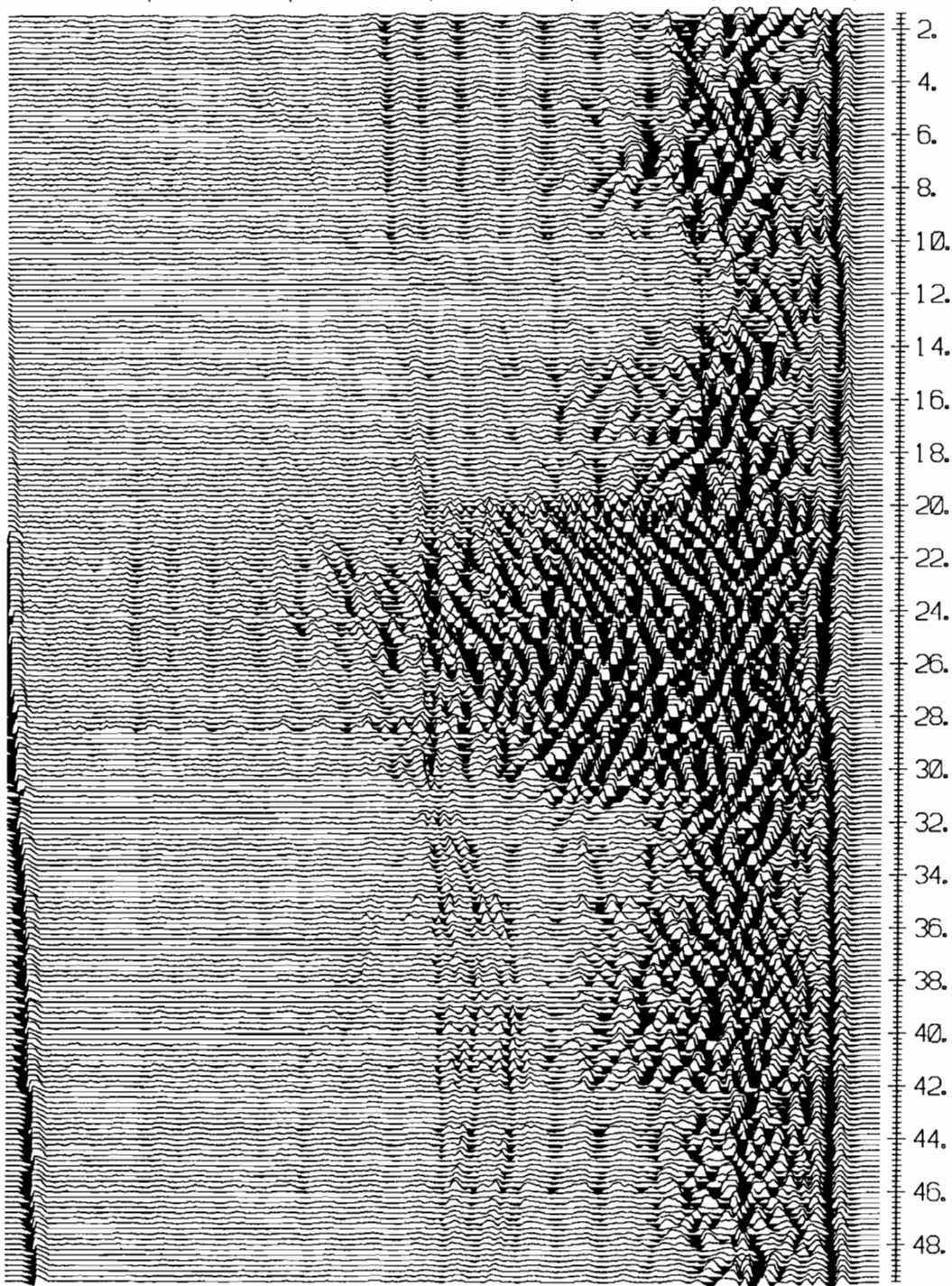
EKKO\SABODAL A\SI T4\PRO100 Time (ns)



EKKO\SABODAL A\SI T4\PRO200

Time (ns)

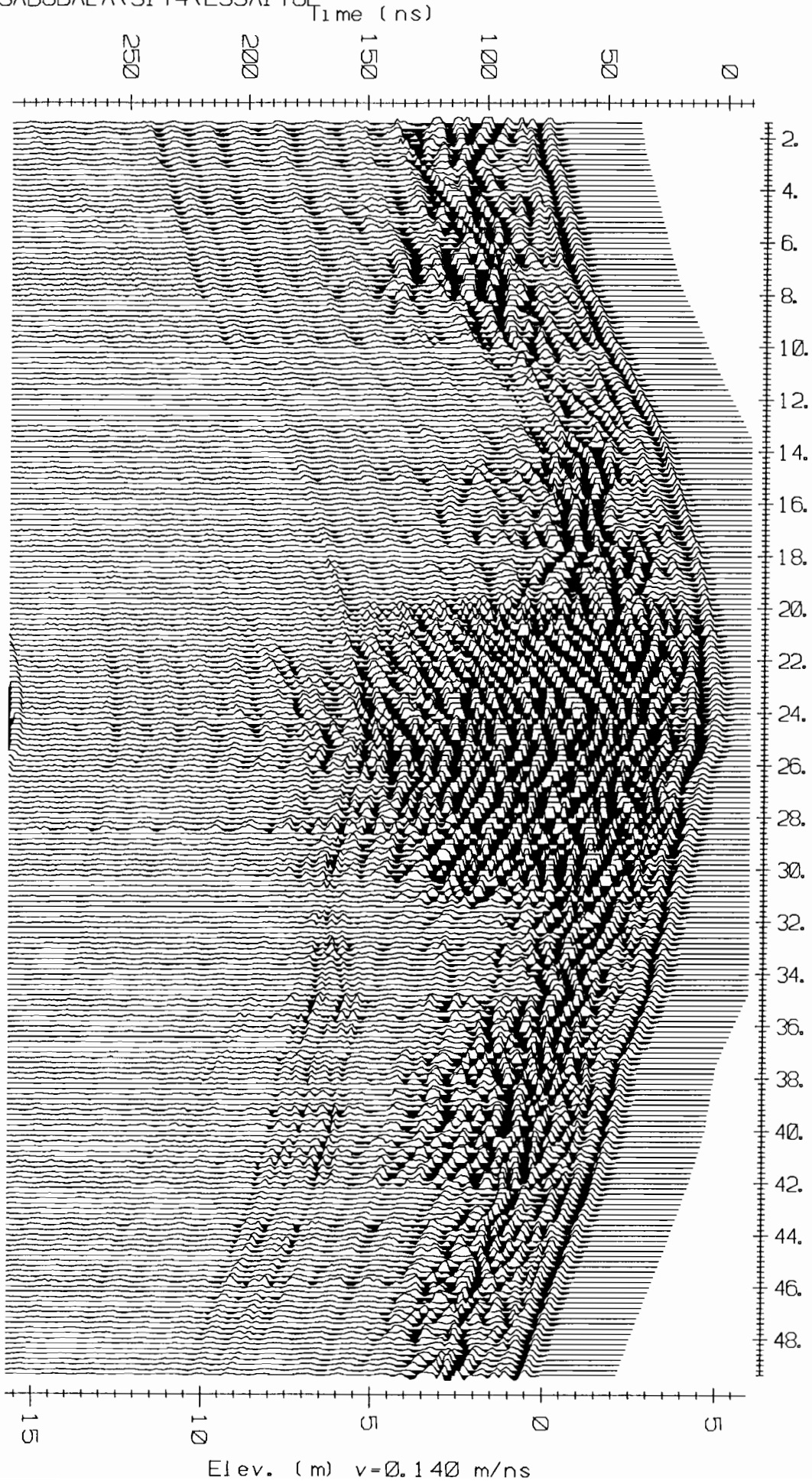
250 200 150 100 50 0



20.0 15.0 10.0 5.0 0.0

Depth (m) $v=0.140$ m/ns

EKKO\SABODAL A\SI T4\ESSAI TOP



Elev. (m) $v=0.140$ m/ns

L'enregistrement TRANSLU2 a été fait avec les antennes de 200 MHz, en plaquant une des antennes (A) sur le filon dans la tranchée et en déplaçant la deuxième antenne (B) sur l'affleurement du quartz. Le pas de mesure a été calculé de façon à ce que la distance entre les antennes augmente d'un pas constant. Cette distance est l'hypoténuse d'un triangle rectangle formé par la distance entre le haut de la tranchée et l'antenne A verticalement, la tranchée et l'antenne B horizontalement.

Ainsi, les ondes allant de l'émetteur au récepteur sont les ondes directes dans la roche, ce qui permet de calculer la vitesse des ondes dans le quartz. Ce calcul donne une vitesse de 0,13 m/ns.

Nous avons donné cette vitesse pour la conversion par le logiciel des temps en profondeurs. L'échelle des profondeurs tracée sur les enregistrements est donc valable pour le filon de quartz mais est peut-être fautive pour l'encaissant.

Le profil PR0100 a été fait avec les antennes de 100 MHz, PR0200 avec les antennes de 200 MHz, au même endroit que PR0100, avec le même pas de mesure, égal à 0,20 m.

Nous pouvons voir sur ces enregistrements une partie centrale dans laquelle les ondes se propagent plus profondément, des ondulations dans les cinquante premières nanosecondes et des dômes vers 150 ns.

La partie centrale est le filon de quartz. De part et d'autre, l'encaissant est volcano-sédimentaire.

Cependant, le filon de quartz n'était pas vertical à l'affleurement, comme pourrait le laisser penser l'enregistrement : nous avons pu estimer le pendage du filon à 45°, vers les abscisses croissantes.

Le fait qu'on ne voit pas le pendage réel du filon de quartz est dû à l'altération de l'encaissant. En effet, sur le filon, il n'y a pas d'altération donc les ondes se propagent bien. Par contre, quand les antennes sont posées sur l'encaissant, le terrain ne permet pas aux ondes de se propager en profondeur. Elles n'atteignent pas le quartz. On ne peut donc pas voir sur l'enregistrement le contact incliné du quartz et de l'encaissant.

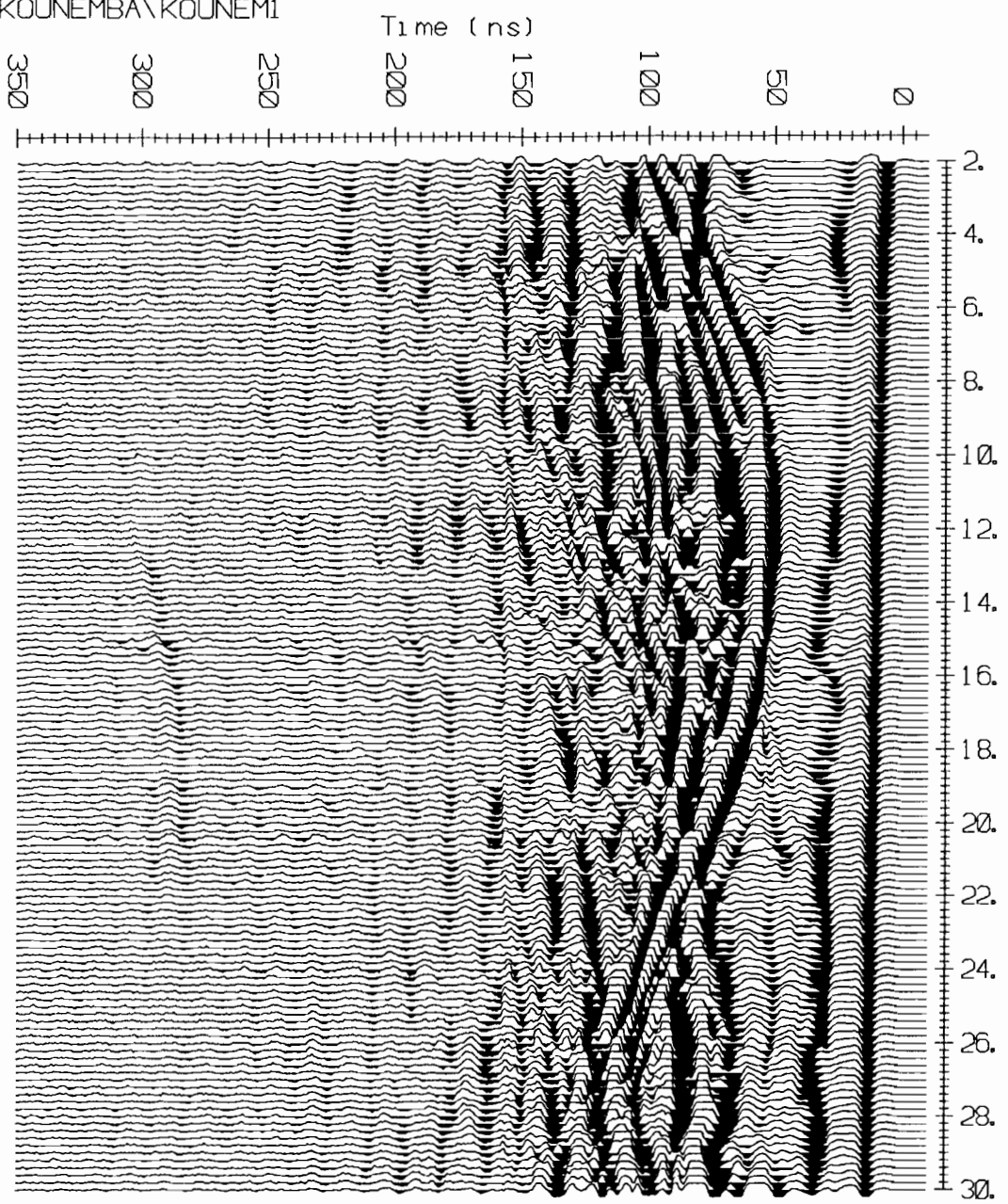
ESSAITOP est le profil réalisé à 200 MHz (PRO200) auquel nous avons appliqué la topographie. De même que pour les profils, nous avons donné la vitesse de 0,13 m/ns pour l'élévation ; cette vitesse n'est peut-être pas celle de l'encaissant volcano-sédimentaire. De plus, l'échelle des abscisses n'est pas la même que celle des profondeurs. Il en résulte une distorsion des pendages.

Le troisième site était constitué d'un filon de quartz sous une couverture gravillonnaire.

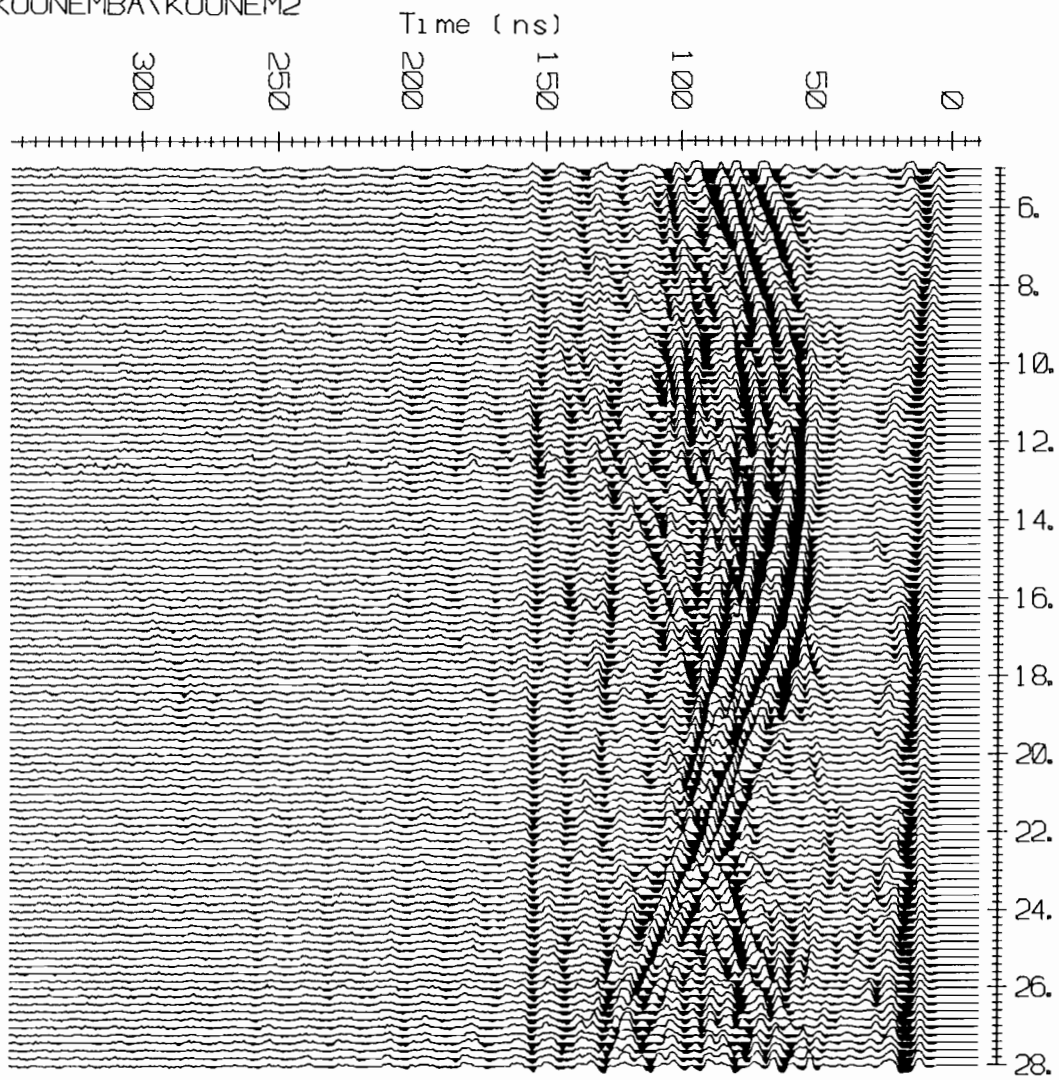
KOUNEM1 a été réalisé avec les antennes de 100 MHz, KOUNEM2 avec celles de 200 MHz.

Nous voyons sur les enregistrements les mêmes structures en dôme que sur le profil PRO200, mais à plus faible profondeur. On peut penser qu'elles marquent la limite de l'altération. Le filon, d'une largeur de deux mètres à l'affleurement, ne semble pas détecté par le radar. Le contraste de constante diélectrique n'est peut-être pas suffisant entre la couverture et le filon.

EKKO\KOUNEMBA\KOUNEM1



EKKO\KOUNEMBA\KOUNEM2



IV.2.3.2.Talus de route.

Les enregistrements ont été réalisés sur le haut du talus d'une route ; nous avons ainsi la coupe géologique correspondant à la coupe radar.

Les deux paires d'antennes ont été utilisées.

Nous voyons sur les enregistrements des formes de dôme ainsi qu'un niveau parfaitement horizontal à 150 ns.

Le niveau horizontal peut être la réflexion des ondes émises dans l'air contre le talus de l'autre côté de la route. Un temps double de 150 ns correspond à une distance de 22,5 m avec une vitesse de 0,3 m/ns ; nous avons mesuré la distance entre les deux talus, qui était environ de 22,5 m.

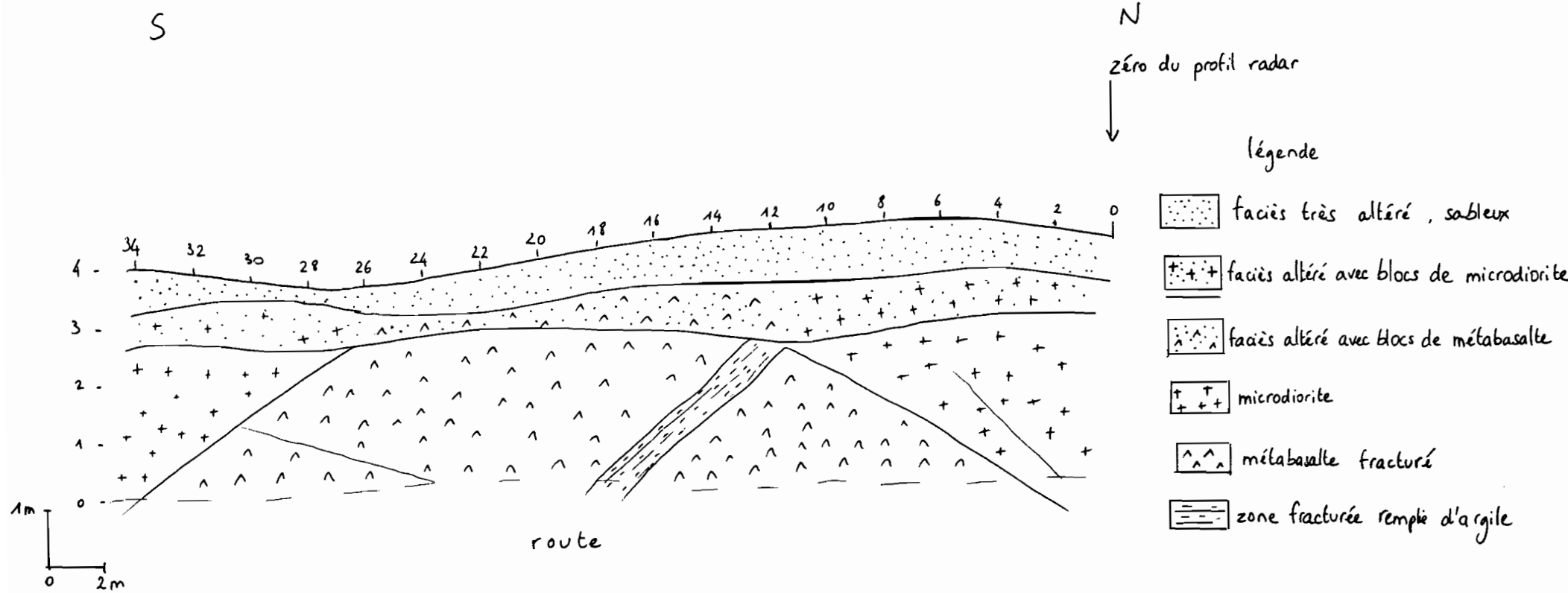
Les dômes dessinent la limite d'altération que nous avons observée sur le talus. En dessous des faciès très altérés, des fractures affectent la roche et l'altération de celle-ci forme aussi des dômes. C'est la combinaison de ces deux structures que l'on peut observer sur les coupes radar.

Des positions 0 à 10 m, le haut du dôme limite le faciès altéré et les microdiorites, puis dans le sens des abscisses croissantes, la pente du dôme correspond à la zone structurée avec remplissage d'argile.

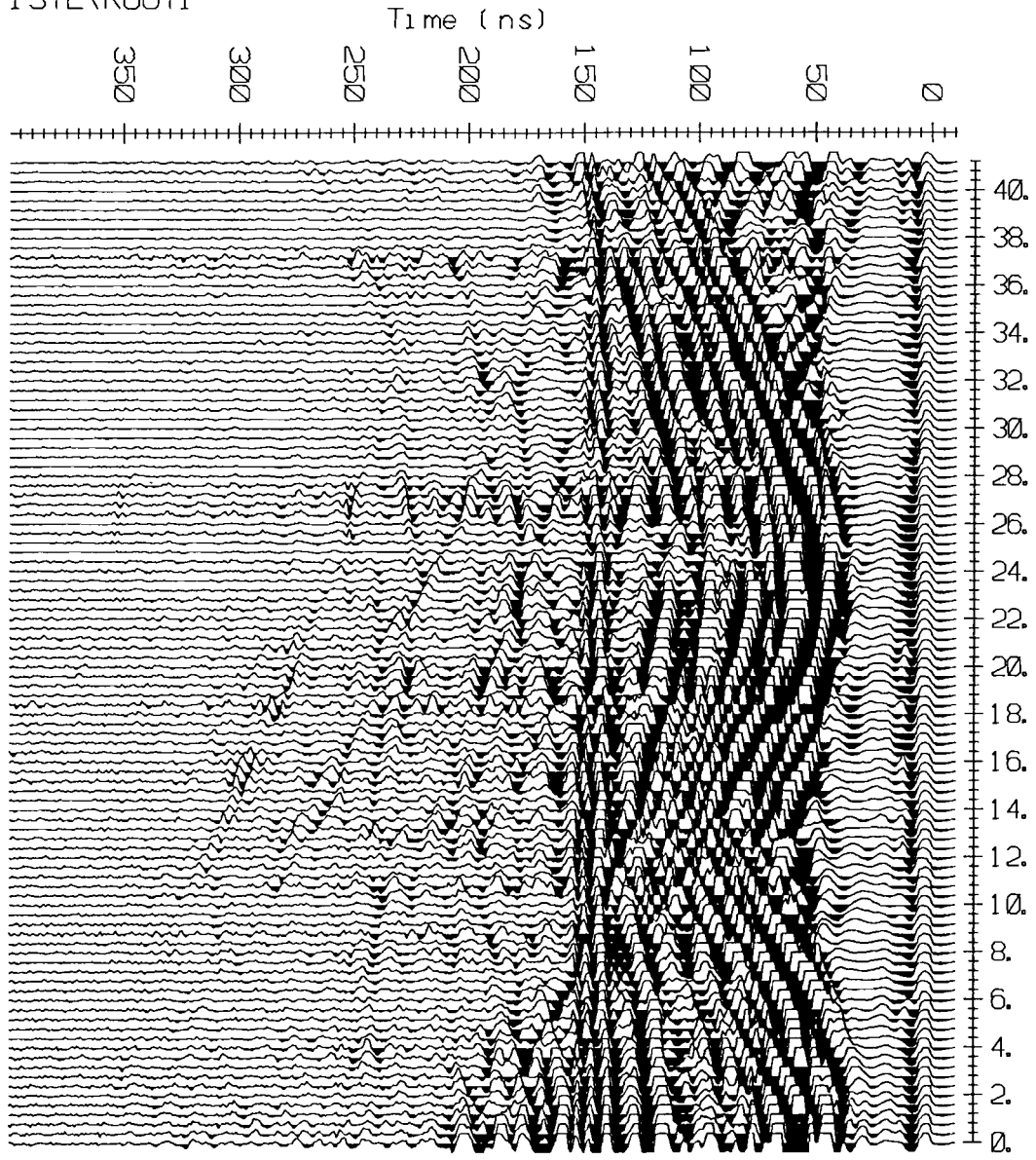
De même, on peut suivre la limite du faciès altéré et du metabasalte des positions 14 à 24 m, puis le contact du metabasalte et des microdiorites de 26 à 34 m.

En dessous des zones de contact, l'observation des affleurements sur le terrain et sur des photos indique des formes en dôme dues à l'altération progressive, ce qui explique la succession de ces structures en profondeur sur les enregistrements.

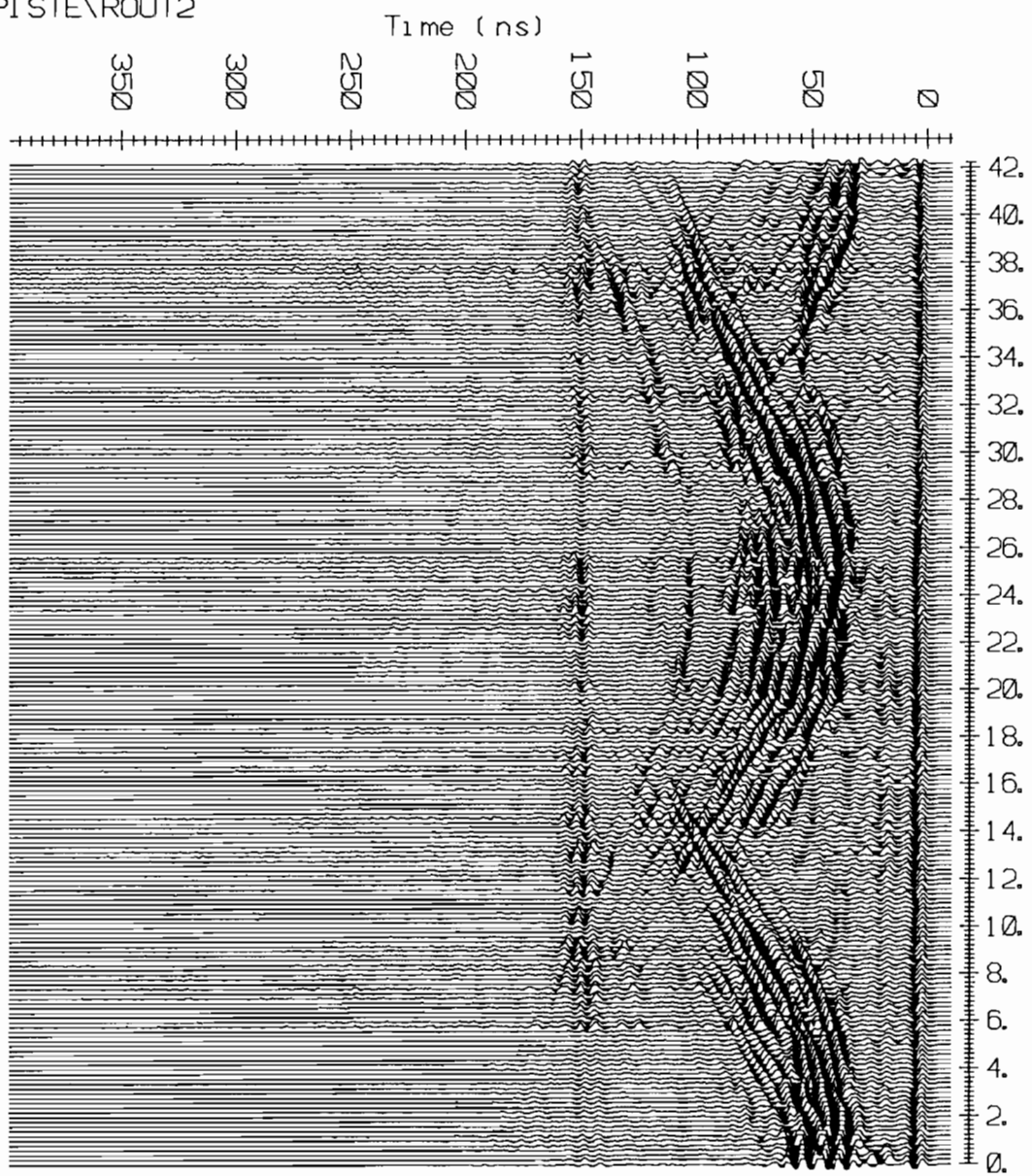
Coupe géologique du talus de la route.



.EKKO\PI STE\ROUT1



EKKO\PI STE\ROUT2



IV.2.4. Conclusion.

Nous constatons que la pénétration des ondes dans le terrain est satisfaisante et nous obtenons des images précises. Mais celles-ci sont difficiles à quantifier dans la mesure où nous n'avons pas pu obtenir des informations détaillées de la part des géologues avec qui nous avons travaillé.

D'autre part, le radar permet une bonne observation de l'altération des terrains ainsi que de leur structure.

Pour mieux connaître la réponse du radar aux terrains rencontrés dans cette région, il serait intéressant d'effectuer des fosses d'observation à l'aplomb des profils radar et d'avoir accès à la mine où nous devions travailler. En effet, de nombreux forages, verticaux et inclinés, ont été faits ; par conséquent, la géologie y est parfaitement connue. Ce site permettrait un bon étalonnage du radar.

IV.3. Localisation de la nappe phréatique et géométrie de bourrelet de berge dans la vallée du fleuve Sénégal.

IV.3.1. Introduction.

Depuis la construction du barrage de Manantali sur le fleuve Sénégal au Mali, la culture d'irrigation a été développée.

Le barrage a pour but de maîtriser les niveaux d'eau : maintenir un niveau d'étiage suffisant (faibles débits) ainsi que diminuer les débits de crue. Par conséquent, les débits de pompage pour l'irrigation sont garantis. Les périmètres irrigués permettent la culture du riz, de tomates et d'oignons.

Dans le passé, la vallée du fleuve comportait déjà des parcelles irriguées ; les autres cultures se faisaient selon le régime de décrue.

Le fleuve, alimenté par des affluents qui drainent des régions montagneuses arrosées, en Guinée et au Mali, était en crue au mois d'août à Podor. La crue atteignait son maximum dans le courant du mois de septembre, avec une amplitude moyenne de quatre mètres. La décrue, amorcée au début du mois d'octobre, amenait le retrait progressif des eaux pendant lequel les paysans semailent les cultures.

Mais l'irrigation peut entraîner la salinisation et l'alcalinisation des terrains.

La salinisation est la conséquence de la remontée de sel avec la nappe phréatique, que l'irrigation fait remonter. Ce sel provient des couches fossiles déposées lors des dernières intrusions marines.

L'alcalinisation est due à l'apport en eau d'irrigation. Cette eau contient peu de sels solubles mais peut saler les terrains du fait de la concentration par évaporation et de

la rétention de ces eaux dans les cinquante premiers centimètres. Il peut alors se produire une précipitation des sels carbonatés.

Les terrains deviennent inutilisables et les conséquences peuvent être désastreuses pour les paysans.

La section Pédologie de l'ORSTOM s'intéresse plus particulièrement aux conséquences à long terme de l'irrigation, à savoir si effectivement elle provoque la salinisation des terrains et dans quelle mesure.

Un volet de cette recherche est consacré à l'étude de la nappe et de la zone non saturée pour connaître les processus hydriques : lessivage ou dépôt des sels, transferts de la nappe.

Pour cela, des piézomètres ont été installés sur des parcelles dans la région de Podor, afin de suivre la profondeur et la qualité de la nappe.

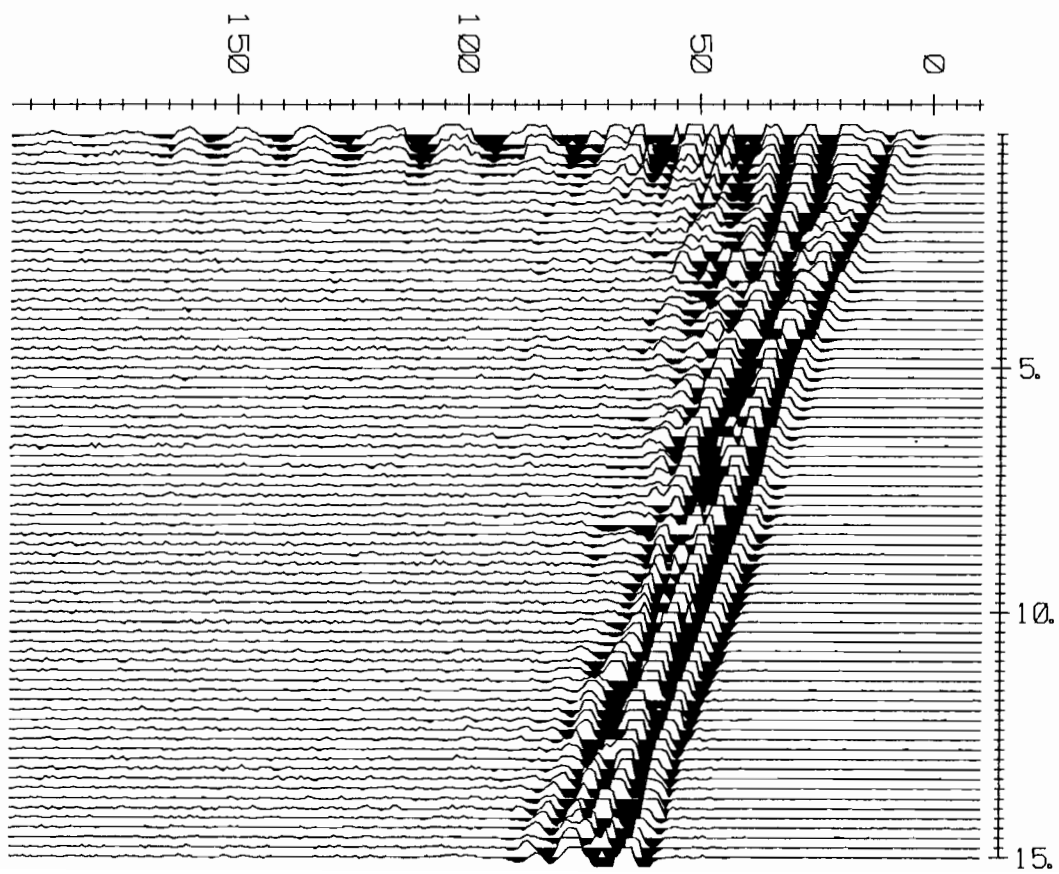
L'une de ces parcelles a constitué une zone de test de la géophysique : il s'agissait pour nous de voir si le radar pouvait localiser la nappe située à une profondeur approximative de 3 m. Des mesures ont aussi été faites en prospection électrique.

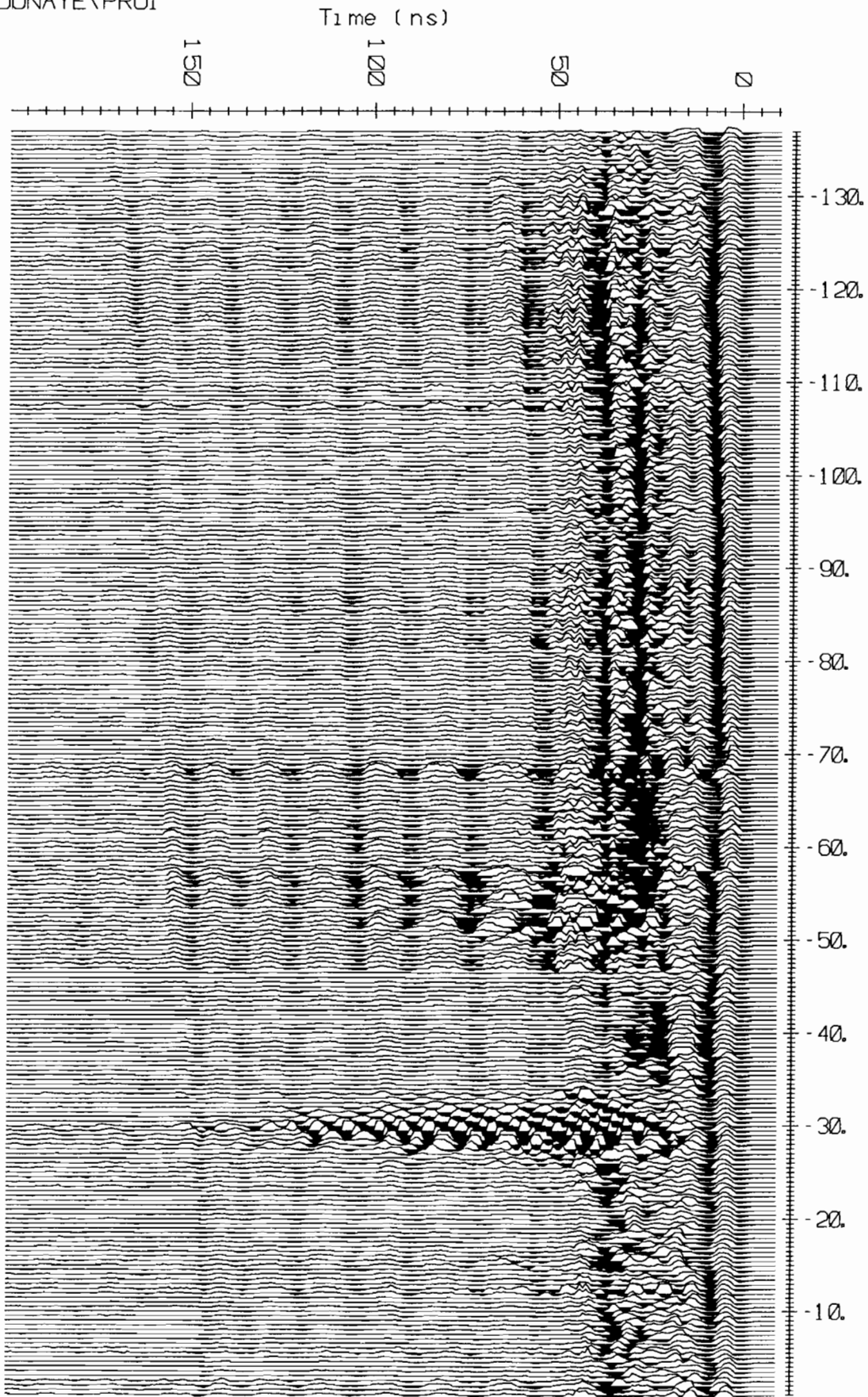
Le second site est composé d'un cours d'eau, bordé par un bourrelet de berge, puis une cuvette.

Le bourrelet se forme par débordement du cours d'eau pendant la crue. En franchissant les berges, le cours d'eau dépose ses sédiments, les plus grossiers d'abord puis les éléments les plus fins jusque dans la cuvette où se trouvent des terrains très argileux. Le bourrelet est donc assez limoneux, voire sableux.

Les pédologues, connaissant mal la géométrie de ce bourrelet, nous avaient chargés de la déterminer.

Time (ns)





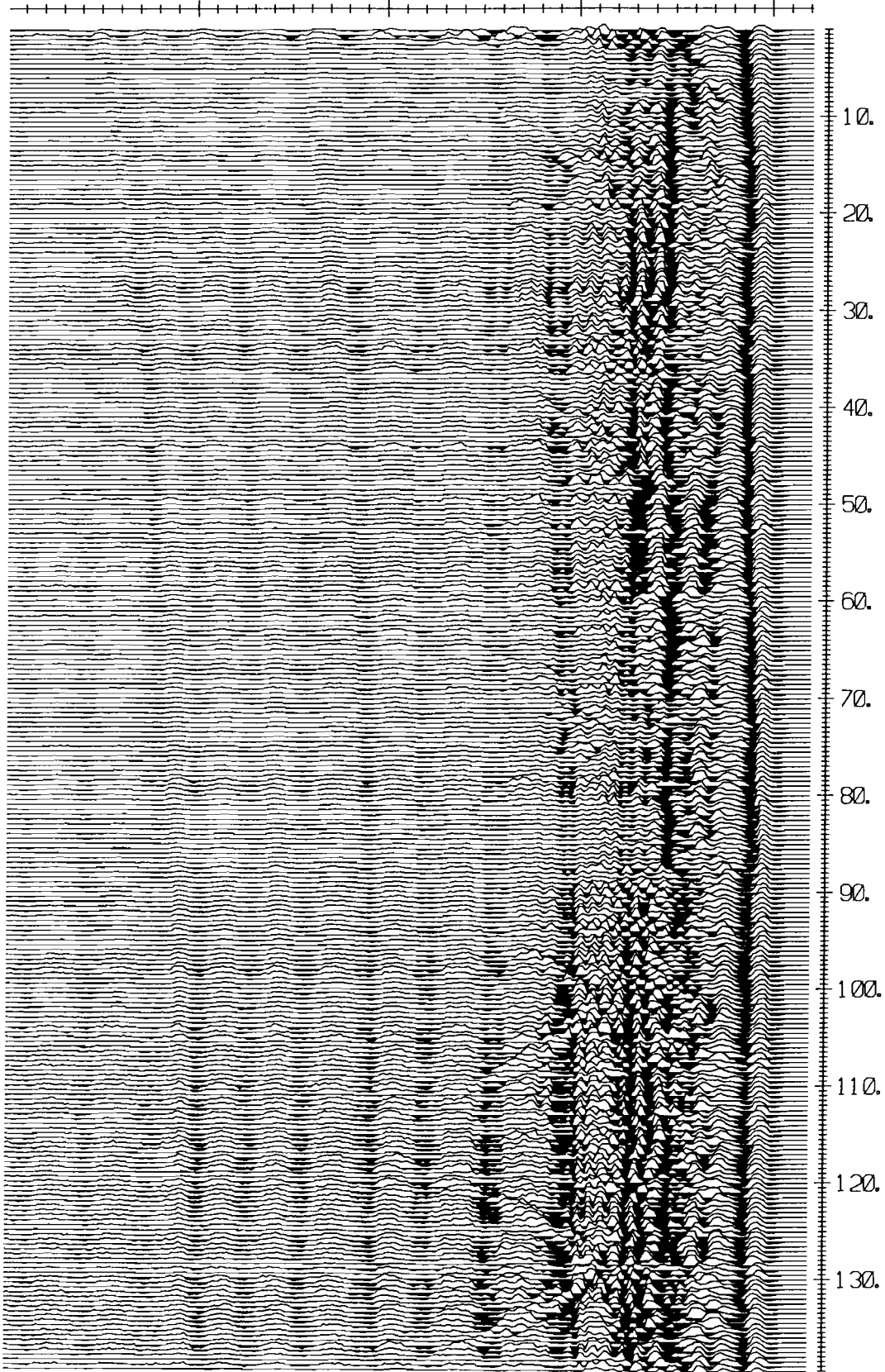
Time (ns)

150

100

50

0



IV.3.2.Résultats.

IV.3.2.1.Parcelle de Donaye.

Les mesures ont été réalisées avec les antennes de 200 MHz, sur une longueur totale de 277 m, en deux profils de même direction.

Le CMP ne présente pas de résultats interprétables, on ne voit pas la droite de l'onde directe dans le sol. On ne peut donc pas en déduire la vitesse des ondes dans le terrain.

On voit essentiellement sur le profil la position des piézomètres qui étaient entourés de grillage métallique et la position de la table sur laquelle nous avons posé le matériel.

On voit aussi le couplage d'antennes qui n'est pas horizontal mais incliné du fait du calage de la section (*1st PICK*).

Les terrains étant très argileux, les ondes sont absorbées et ne se propagent pas correctement. On ne peut donc pas observer la nappe phréatique.

IV.3.2.2.Cuvette de Pontgarl.

Le profil que nous avons effectué mesure 215 m de longueur ; il a été réalisé avec les antennes de 200 MHz. Le cours d'eau dont on étudiait le bourrelet de berge est situé à une vingtaine de mètres à gauche du début du profil.

Sur cet enregistrement, nous voyons des structures géologiques dans les quarante premières nanosecondes ; au-delà de 50 ns, il n'y a plus d'information.

Le profil a été commencé à proximité d'un piézomètre métallique : c'est l'hyperbole du début du profil.

A la position 90 m, nous pouvons voir sur la section un V qui peut être un ancien lit de cours d'eau, comblé aujourd'hui. A droite de ce lit, de 95 à 135 m, apparaissent des structures de sédimentation en chenaux, bourrelet de berge de l'ancien cours d'eau.

Le sondage électrique réalisé sur le même profil que la prospection radar indique des terrains très conducteurs entre 90 et 150 m, qui sont donc salés. Or nous savons qu'il existe des chenaux salés dans cette région ; le sondage électrique et le radar donnent donc des résultats cohérents.

A 150 m, nous observons un dôme ; celui-ci peut représenter une structure peu profonde ou marquer la berge d'un autre ancien cours d'eau, dont le fond du lit serait vers la position 142 m.

Au-delà de 155 m, le terrain devient homogène : c'est la cuvette des cours d'eau précédemment rencontrés, remplie d'argiles.

Le cours d'eau actuel situé derrière le piézomètre s'est déplacé : il était auparavant plus à droite. Entre les positions 0 et 75 m, il est possible que l'on observe les dépôts successifs du bourrelet de berge du cours d'eau actuel ainsi que son déplacement vers la gauche. Ces dépôts étant souvent remaniés et non structurés, aucune forme n'apparaît sur l'enregistrement.

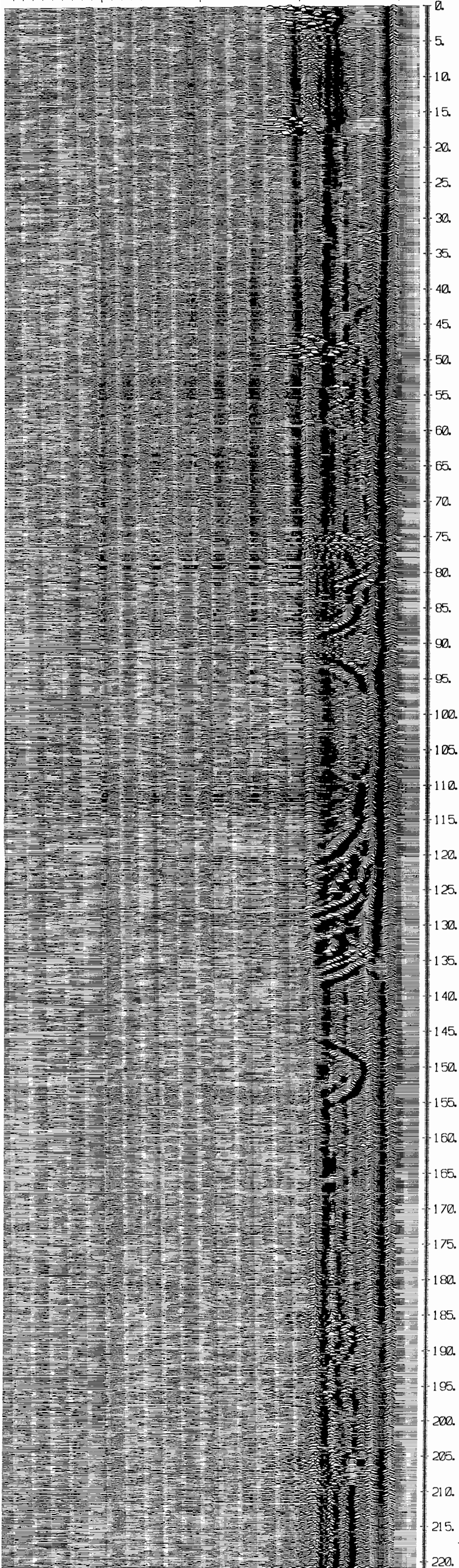
Il serait intéressant de faire des profils parallèles à celui-là pour voir si l'on suit ces anciens lits de rivières, s'ils se rejoignent ou s'ils sont indépendants.

150

100

50

0



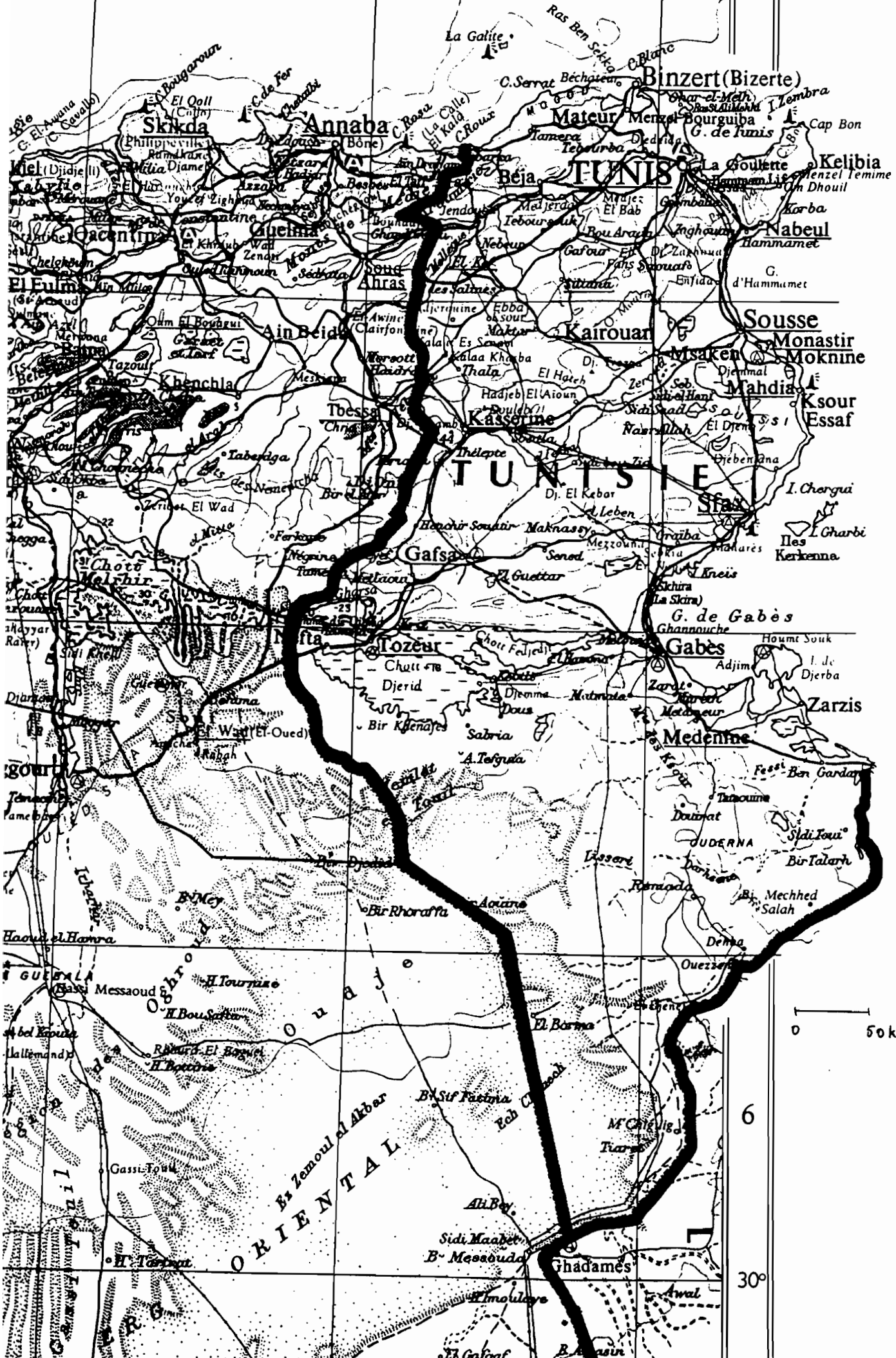
IV.3.3. Conclusion.

Les enregistrements présentés montrent une faible pénétration des ondes due à la présence d'argile en surface.

Les argiles sont sans doute plus humides à Donaye qu'à Pontgari parce que la parcelle de Donaye est inondée tous les ans lors de l'irrigation alors que le cours d'eau à Pontgari ne déborde plus depuis la construction du barrage et de digues, datant d'au moins dix ans. Cela signifie que ce terrain n'est plus mouillé que par la pluie, ce qui représente une faible quantité d'eau par rapport à l'inondation d'irrigation.

Cependant, à Pontgari, il y avait des structures très peu profondes que nous avons pu observer. Si nous n'avons rien vu à Donaye, c'est non seulement dû au fait des argiles relativement humides en surface mais on peut aussi supposer qu'il n'y avait pas de structures à observer.

Les enregistrements CMP que nous avons réalisés à Donaye ne sont pas exploitables à cause de la présence d'argile en surface. Il serait intéressant d'utiliser un TDR en complément du radar pour connaître la vitesse des ondes dans le sol.



0 50 km

6

30°

ORIENTAL

IV.4.Application pédologique : distinction des terrains dans les premiers mètres, lac collinaire d'El Gouazine.

IV.4.1.Introduction.

Le gouvernement tunisien a lancé un projet de construction de mille lacs artificiels dans tout le pays, afin de fixer les populations agricoles et éviter qu'elles ne viennent s'installer dans les villes à cause du manque d'eau pour les cultures. Le problème est l'évolution de la teneur en sels de l'eau des lacs : il faut savoir si l'eau s'évapore plus vite que les lacs ne sont alimentés. Dans ce cas, la teneur en sels de l'eau va augmenter et risque de rendre cette eau impropre aux cultures.

Le projet de l'ORSTOM est de suivre sur plusieurs années l'évolution d'un lac collinaire, situé à El Gouazine, dans la région de Kairouan.

Une digue a été construite pour retenir les eaux du lac. En aval de ce lac, il existe un puits dans lequel le niveau de l'eau est monté depuis la construction du barrage. L'origine de cette eau fait l'objet des recherches actuelles.

Une hypothèse est l'infiltration souterraine des eaux du lac qui alimenteraient ainsi le puits. Or, des bancs calcaires verticaux affleurent au-dessus du lac ; si ces bancs se poursuivent sous le lac, ils pourraient constituer un guide vers les profondeurs pour l'eau.

Notre mission avait donc pour objet de déterminer la nature des affleurements ainsi que les différentes couches de terrain comprises dans les premiers mètres de profondeur.

IV.4.2. Travaux réalisés.

En fait, l'observation sur le terrain des calcaires, confirmée par l'étude de la carte géologique, a montré que ces bancs font partie du synclinal dans lequel a été construit le lac. Il s'agit de bancs de calcaires à huîtres et à gastéropodes. Nous avons effectué des mesures sur des bancs affleurant.

Nous avons ensuite testé le radar sur différents terrains : croûte calcaire peu épaisse surmontant des limons, limons seuls, grès.

IV.4.3. Résultats.

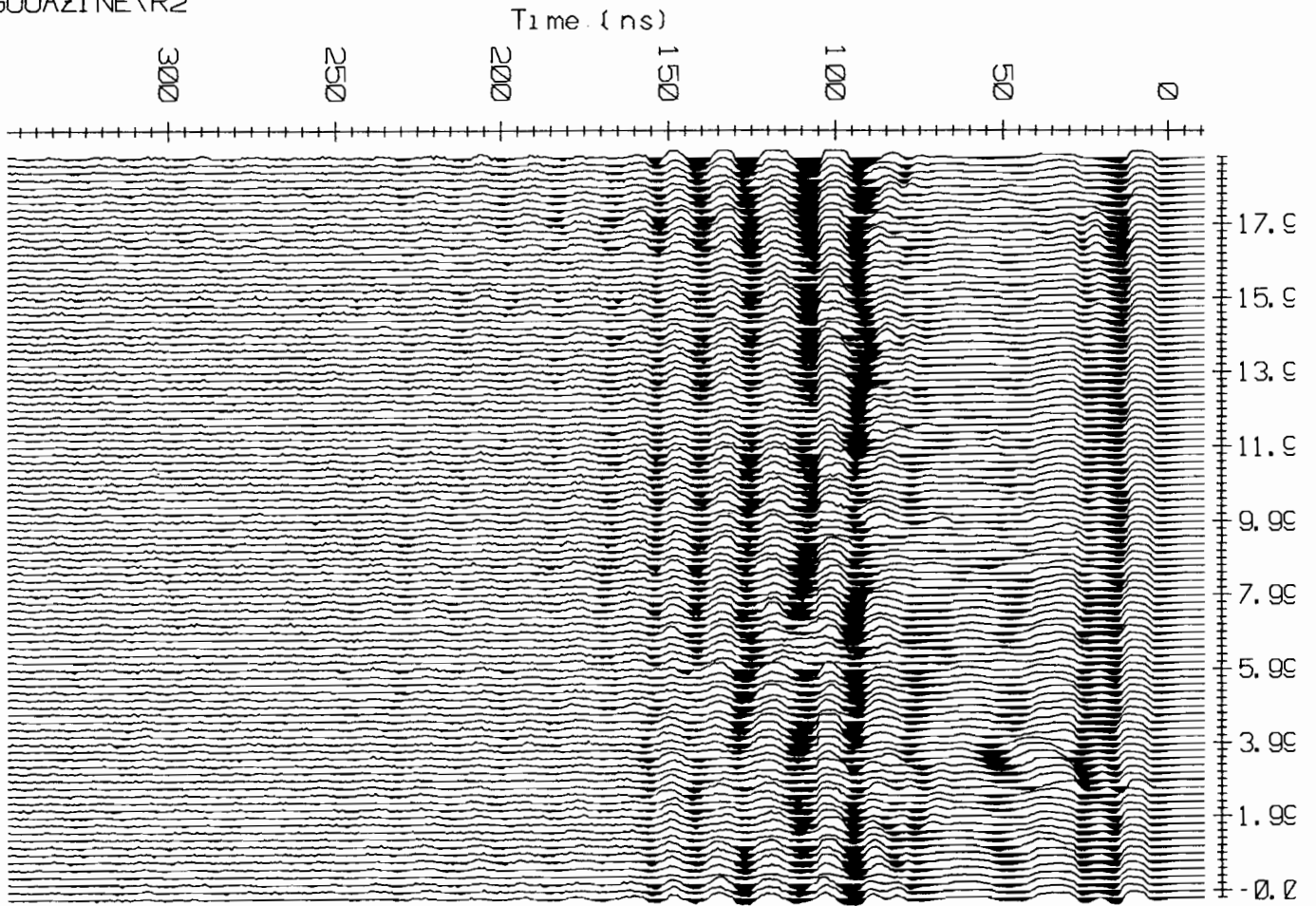
Le premier enregistrement (R2) a été réalisé perpendiculairement aux bancs de calcaire. Le pas qui a été choisi est vingt centimètres ; ce pas est trop grand pour que l'on puisse voir les bancs de calcaires parce que leur épaisseur était de trente à quarante centimètres.

Pour les terrains suivants, nous avons commencé par effectuer des CMP afin de voir si les ondes se propageaient correctement dans le terrain. En effet, nous avons travaillé sur des limons et des argiles qui sont des terrains peu favorables à la propagation des ondes radar.

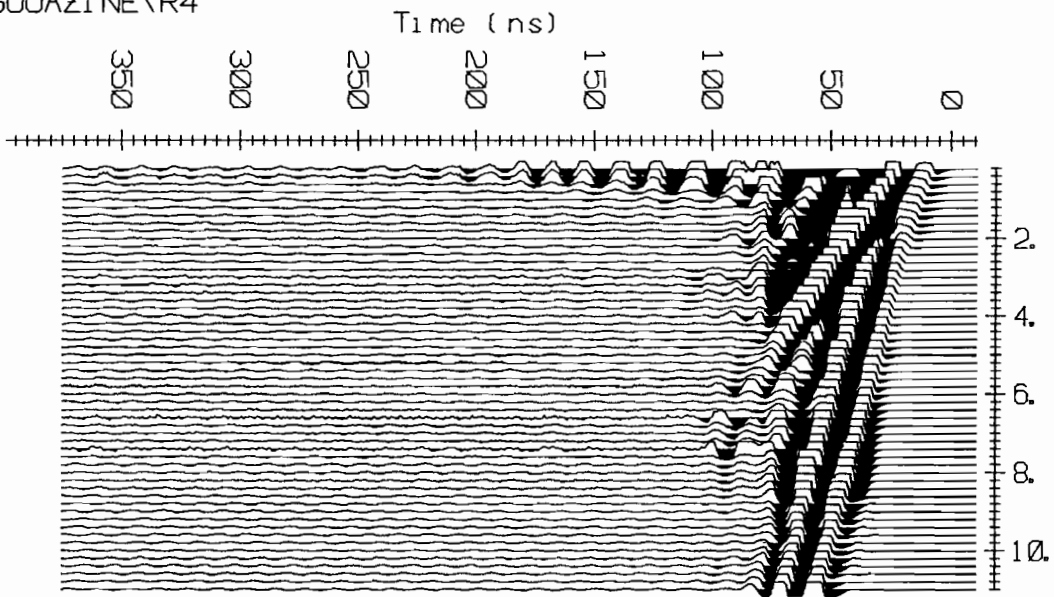
Le CMP R4 a été réalisé sur une croûte calcaire surmontant des limons. Voyant à l'écran les ondes directes dans l'air et dans le sol, nous avons réalisé un profil sur ce terrain. Nous voulions tester la propagation des ondes radar dans les limons, secs à cet endroit-là, et mesurer l'épaisseur de ces limons.

R5 montre les résultats : on ne voit pas la base des limons. Les ondes semblent ne pas se propager dans ce terrain.

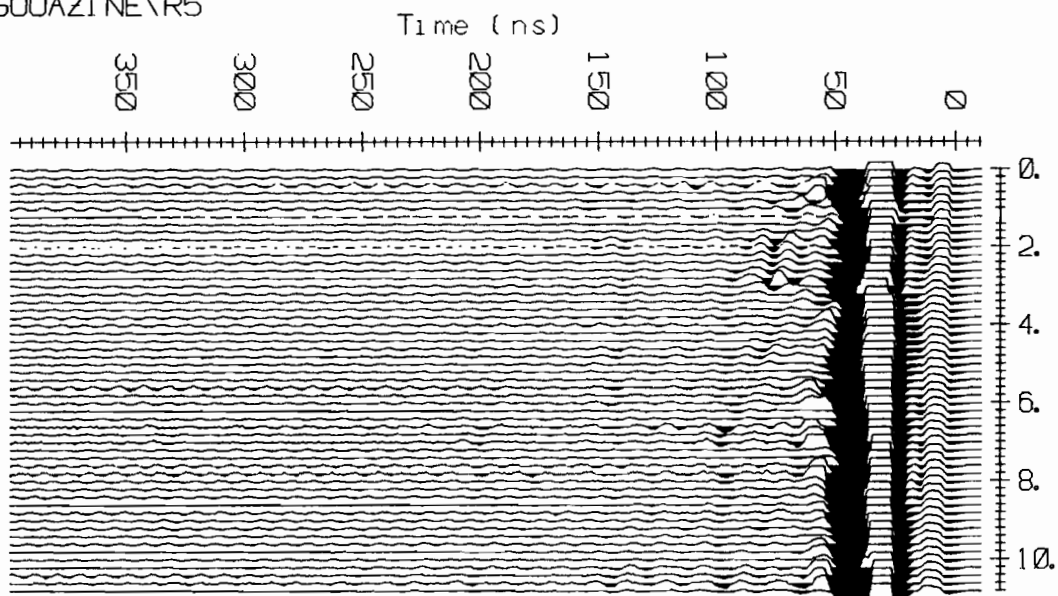
EKKO\GOUAZI NE\R2



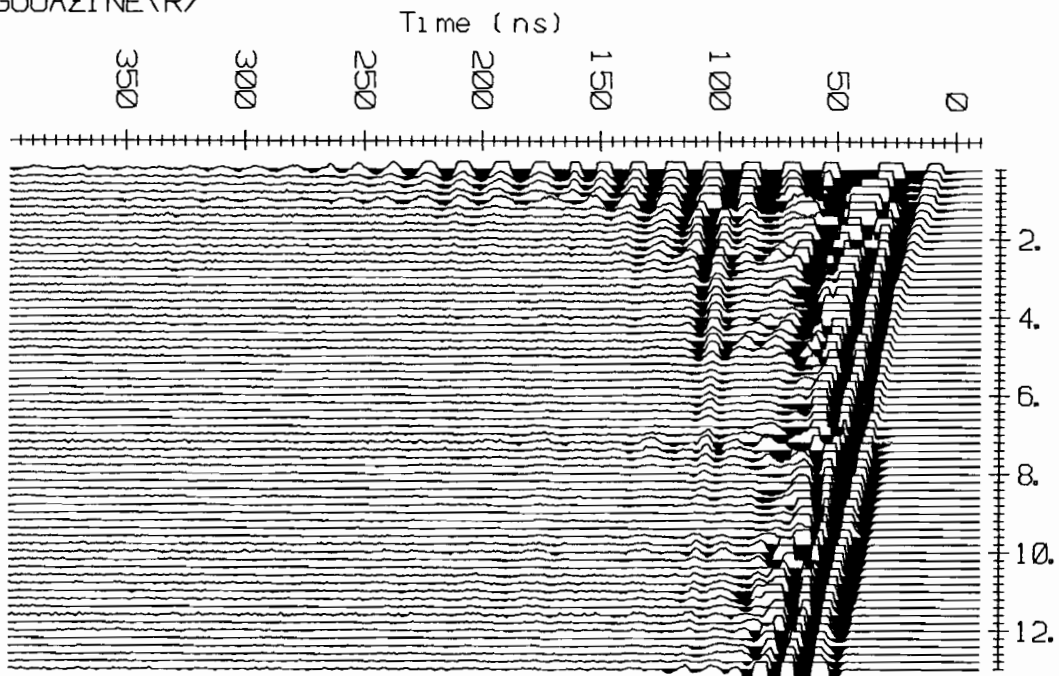
EKKO\GOUAZI NE\R4



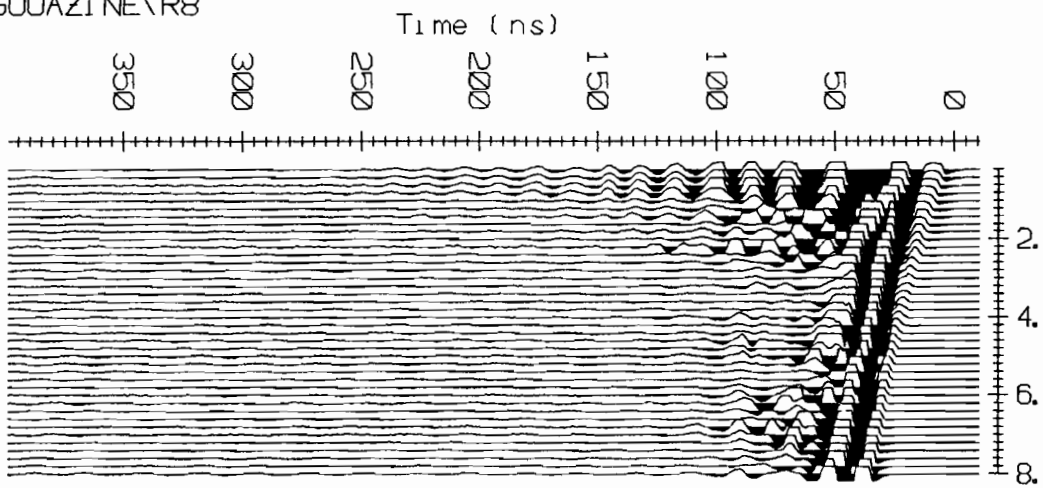
EKKO\GOUAZI NE\R5



EKKO\GOUAZI NE\R7



EKKO\GOUAZI NE\R8



R7 et R8 ont été effectués sur des limons, à 50 et 136 m du bord du lac collinaire.

Les distances sont mesurées perpendiculairement au lac ; les CMP ont été faits parallèlement au lac.

On ne voit pas sur les enregistrements les ondes dans le sol, c'est pourquoi nous n'avons pas fait de profil. L'objectif aurait été de déterminer la profondeur de la nappe.

IV.4.4. Conclusion.

Une fosse d'observation des terrains avait été creusée sur le site ; les terrains dans lesquels nous avons travaillé étaient connus pour être peu favorables à la pénétration des ondes. Les enregistrements le confirment. Les limons et les argiles, plus ou moins saturés en eau, ont une conductivité électrique élevée, ce qui engendre une forte atténuation des ondes dans le sol donc une faible pénétration.

Pour obtenir des résultats plus intéressants, il faudrait utiliser un radar de plus grande puissance afin d'améliorer la propagation des ondes et des antennes de plus hautes fréquences pour obtenir une meilleure résolution, les objectifs étant à faible profondeur. Cependant, il ne faut pas espérer obtenir des informations précises par le radar dans ce type de terrain à forte atténuation des ondes.

CONCLUSION

Le matériel que nous avons utilisé est souple, robuste, pratique et facile à mettre en œuvre. L'acquisition est assez rapide mais les essais à réaliser au préalable sont très importants.

Si un enregistrement est mauvais, l'interprétation sera plus difficile : beaucoup de traitements seront nécessaires. Le traitement de données est nettement simplifié par une acquisition correcte.

Les traitements simples sont indispensables à l'exploitation des données. L'application de différents gains et les représentations variées mettent en évidence l'information. Des traitements sophistiqués sont possibles mais ils ne sont pas toujours nécessaires.

La méthode est donc globalement intéressante, mais peu efficace dans les terrains conducteurs qui engendrent une forte atténuation des ondes, donc qui limitent leur pénétration.

Par ailleurs, ce stage constituait un test de la méthode radar dans des terrains dont on ne connaissait pas la réponse. Des informations géologiques étaient donc nécessaires pour caler les sections obtenues. N'ayant pas eu de coupes géologiques suffisamment précises, il nous est difficile d'interpréter les enregistrements.

Pour poursuivre les expérimentations, il nous semblerait intéressant d'approfondir les essais de position des antennes. De plus, des mesures sur des terrains de nature différente devraient être envisagées afin de bien connaître la réponse du radar à un grand nombre de type de sols. Lorsque le radar aura été étalonné dans ces terrains, il constituera alors une excellente méthode d'investigation des premiers mètres du sous-sol.

BIBLIOGRAPHIE

- ANNAN, A.P. : Ground penetrating radar : Workshop notes.
SENSORS & SOFTWARE, 1992.
- ANNAN, A.P. : Practical processing of GPR data.
SENSORS & SOFTWARE Technical Manuel, 1993.
- ASTIER, J.L. : Le radar géologique, 1990.
- CAMERLYNCK, C., DABAS, M., PANISSOD, C. : Comparison between GPR and four electromagnetic methods for stone features characterization : an exemple.
Archaeological Prospection, **1**:5-17, 1994.
- COLLINS, M.E., HANNINEN, P., LOPEZ-PINEIRO, A. : Field determinations of soil dielectric constants as related to ground-penetrating radar.
Advanced ground penetrating radar : technologies and applications, Columbus, Ohio, p197, 1993.
- DALLIMORE, S.R., DAVIS, J.L. : Ground penetrating radar investigations of a massive ground ice.
Geological survey of Canada, Paper 90-4, p41, 1992.
- DAVIS, J.L., ANNAN, A.P. : Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy.
Geophysical Prospecting, **37**:531-551, 1989.
- GOODMAN, D. : Ground-penetrating radar simulation in engineering and archaeology.
Geophysics, **59**:224-232, 1994.
- HOLLOWAY, A.L. : Fracture mapping in granite rock using probing radar.
Geological survey of Canada, Paper 90-4, p85, 1992.
- HOLUB, P., DUMITRESCU, T. : Détection des cavités à l'aide de mesures électriques et du géoradar dans une galerie d'amenée d'eau.
Journal of Applied Geophysics, **31**:185-195, 1994.
- HULIN, M. : Ondes électromagnétiques.
Armand Colin, 1971.
- NIELSEN, D.C., LAGAE, H.J., ANDERSON, R.L. : Time-Domain Reflectometry measurements of surface soil water content.
Soil Science Society of America Journal, **59**:103-105, 1995.
- VAN OVERMEREEN, R.A. : Georadar for hydrogeology.
First break, **12**:401-408, 1994.
- REDMAN, J.D., ANNAN, A.P. : Dielectric permittivity monitoring in a sandy aquifer following the controlled release of a DNAPL.
Geological survey of Finland, 1992.
- ROBERT, A., DE BOSSET, C. : Application du géoradar à la localisation de cavités, de nids de gravier et de zones karstiques.

- Journal of Applied Geophysics, **31**:197-204, 1994.
- SENSORS & SOFTWARE INC. : pulseEKKO 100, User's guide.
Technical Manuel, 1994.
- SENSORS & SOFTWARE INC. : EKKO_TOOLS, User's guide.
Technical Manuel, 1993.
- SIGURDSSON, T. : Application of GPR for geological mapping, exploration of industrial mineralization and sulphide deposits.
Fifth International Conference on GPR, Waterloo, Canada, 1994.
- TELFORD : Prospection géophysique.
- THEIMER, B.D., NOBES, D.C., WARNER, B.G. : A study of geoelectrical properties of peatlands and their influence on ground-penetrating radar surveying.
Geophysical Prospecting, **42**:179-209, 1994.
- TILLARD, S. : Evaluation de la technologie radar en prospection géophysique :
approche théorique et expérimentale.
Mémoire de diplôme d'ingénieur, Université de Strasbourg, 1988.