

INTERREG II
RIVES - MANCHE

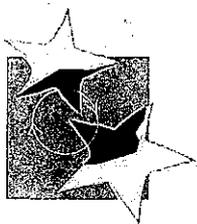


DOCUMENT PUBLIC

*Détermination par sismique réfraction et
sismique transparence de la structure du
massif crayeux en bordure de la falaise d'Ault (80)*

août 2001
BRGM/RP-51080-FR





INTERREG II
RIVES - MANCHE



DOCUMENT PUBLIC

*Détermination par sismique réfraction et
sismique transparence de la structure du
massif crayeux en bordure de la falaise d'Ault (80)*

J.M. Baltassat, F. Lejeune, G. Richalet

août 2001
BRGM/RP-51080-FR



Mots clés : Géophysique, Sismique, Réfraction, Transparence, Tomographie, Craie, Altération, Zone de fracture, Ault, Somme, Picardie.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Baltassat J.-M., Lejeune F., Richalet G. (2001) - Détermination par sismique réfraction et sismique transparence de la structure du massif crayeux en bordure de la falaise d'Ault (Picardie). BRGM/RP-51080-FR, 39 p., 5 fig., 2 pl.

© BRGM 2001. Ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Dans le cadre du projet INTERREG II ROCC (Risk of Cliff Collapse) Picardie, le site de Ault, où un effondrement important se produisit en 1998, a été choisi comme site pilote où tester l'application de méthodes sismiques pour caractériser la structure du massif crayeux et déterminer la distribution des vitesses sismiques en bordure de falaise en vue de mettre en évidence la fracturation et l'altération du massif crayeux.

Dans un secteur carré de 250 m de côté situé dans la partie sud de la ville ont été mis en œuvre :

- la méthode sismique réfraction le long de 5 profils orientés dans deux directions orthogonales ;
- la méthode sismique transparence autour de trois forages.

Les structures suivantes ont été mises en évidence :

- selon une direction SE-NW, des zones de faiblesse du massif crayeux qui sont attribuées à des zones de fracture ;
- un contact marqué entre des terrains plus rapides au nord (en direction de la falaise) et plus lents au sud dans la couche superficielle (jusqu'à dix mètres de profondeur). Cette variation latérale et localisée de faciès sismique est interprétée, en l'absence d'information complémentaire, comme une variation de faciès ou d'altération de la craie.

Aucune diminution des vitesses sismiques, tel qu'attendu du fait de la décompression des terrains, n'est observée en direction de la falaise. L'épaisseur d'altération, faible en fond de vallée et importante en haut de coteau est, en revanche, conforme au schéma d'une altération uniforme entaillée par l'érosion.

Les deux méthodes utilisées donnent des résultats en parfaite cohérence. Toutefois, considérant le rapport de 1 à 5 entre les prix de revient des deux méthodes, la sismique réfraction plus facile à mettre en œuvre et plus rapide à compiler est recommandée.

Des recommandations méthodologiques portant sur l'utilisation de chaque méthode sont en outre, énoncées.

Sommaire

1. Introduction	7
2. Méthodes et moyens	9
2.1. Principe des méthodes sismiques réfraction et transparence.....	9
2.2. Moyens mis en œuvre.....	9
2.2.1. Personnel	10
2.2.2. Équipement.....	10
2.3. Travaux réalisés	10
2.3.1. Sismique réfraction.....	10
2.3.2. Sismique en transparence	12
3. Résultats	15
4. Conclusion	19

Liste des illustrations

FIGURES

Fig. 1 - Localisation des investigations	6
Fig. 2 - Dispositif de mesure sismique transparence forage-forage et forage-surface (en haut) et dispositif sismique réfraction (en bas)	8
Fig. 3 - Source chute de poids Wakimpack en action sur le profil sismique réfraction P5	11
Fig. 4 - Dispositif sismique transparence rue Sainte-Marie avec représentation des raies droites.....	11
Fig. 5 - Synthèse des résultats.....	14

PLANCHES

Pl. 1 - Coupes sismiques interprétatives, résultat des investigations selon les profils SW-NE.....	16
Pl. 2 - Coupes sismiques interprétatives, résultat des investigations selon les profils NW-SE.....	17

Liste des annexes

Ann. 1 - Courbes temps-distance des arrivées premières de sismique transparence	21
Ann. 2 - Courbes temps-distance des arrivées premières de sismique réfraction.....	33

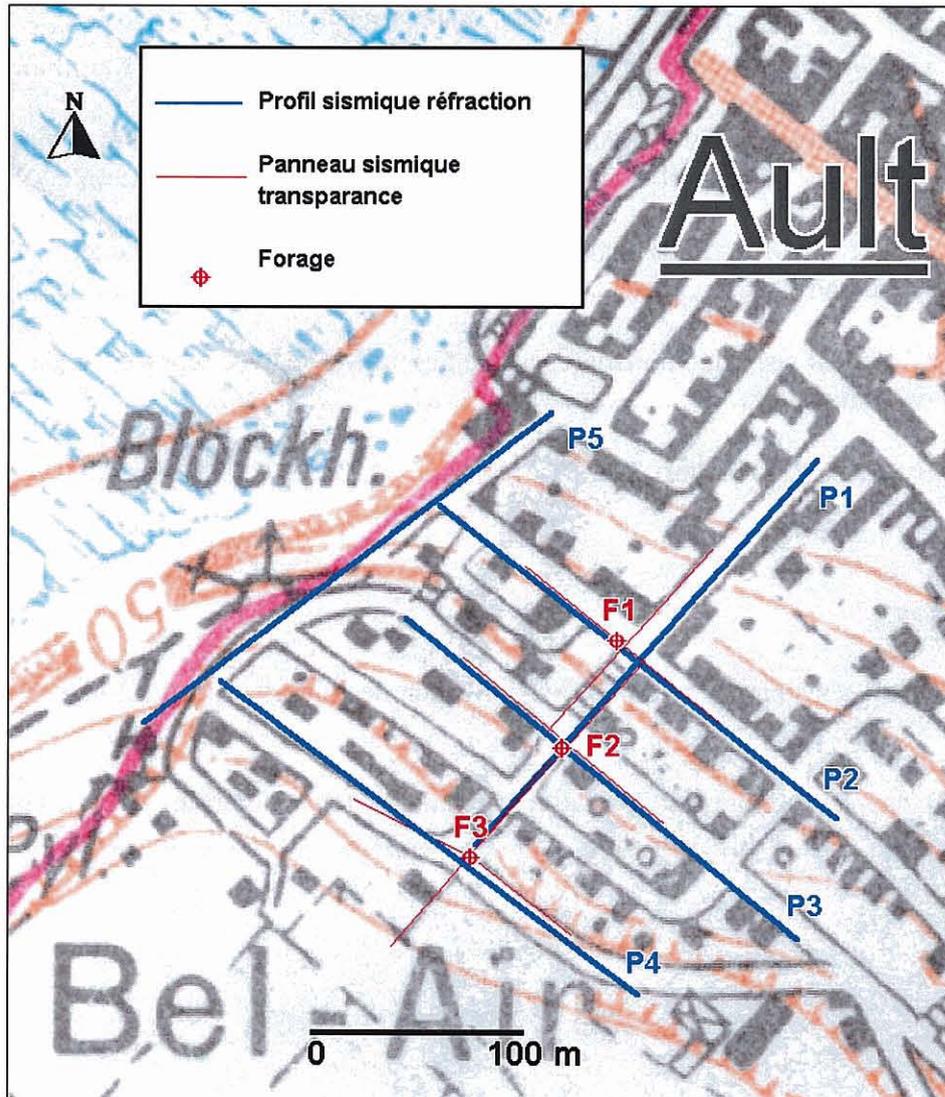


Fig. 1 - Localisation des investigations.

1. Introduction

Dans le cadre du projet INTERREG II ROCC (Risk of Cliff Collapse) Picardie, le site de Ault, où un effondrement important se produisit en 1998, a été choisi comme site pilote où tester l'application de méthodes sismiques pour caractériser la structure du massif crayeux et déterminer la distribution des vitesses sismiques en bordure de falaise.

Une zone d'investigation a été définie sur la rive gauche de la vallée d'Ault, dans la partie sud du bourg sur une emprise de 250 par 250 m environ, en bordure de falaise (fig. 1).

Deux méthodes sont testées :

- la sismique réfraction mise en œuvre le long de profils rectilignes,
- la sismique en transparence entre forage et surface.

L'objectif de cette investigation est de déterminer la distribution des vitesses sismiques des ondes de compression (V_p) dans le massif crayeux en bordure de falaise et ainsi de mettre en évidence des zones plus ou moins altérées et fracturées/fissurées qui peuvent être liées à ou participer au contrôle de l'évolution de la falaise.

Les terrains sont composés de la craie plus ou moins altérée.

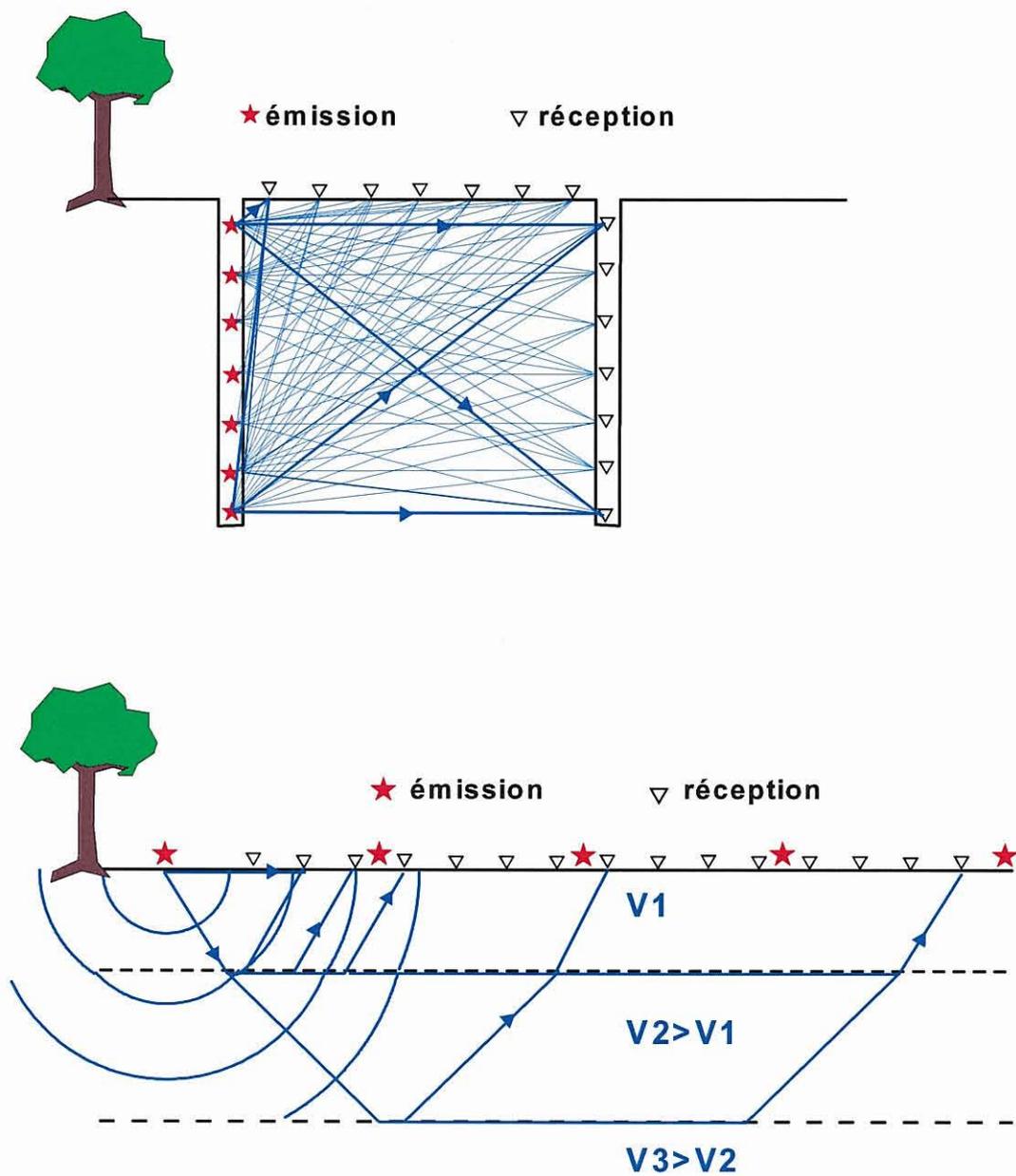


Fig. 2 - Dispositif de mesure sismique transparence forage-forage et forage-surface (en haut) et dispositif sismique réfraction (en bas).

2. Méthodes et moyens

2.1. PRINCIPE DES MÉTHODES SISMIQUES RÉFRACTION ET TRANSPARENCE (fig. 2)

Les méthodes classiques de sismique réfraction et de sismique transparence basées sur les temps de propagation des ondes sismiques de compression sont utilisées.

En **sismique réfraction**, les ondes sismiques générées en plusieurs points à la surface du sol (points de tir) sont enregistrées suivant un dispositif de capteurs (géophones), régulièrement espacés le long d'un profil rectiligne. L'analyse des temps de trajet (arrivées premières) des ondes sismiques selon les principes de propagation directe et réfractée conduit à définir les vitesses sismiques et les géométries des différentes couches du sous-sol. En résultat sont définies, le long des profils de mesure, des coupes sismiques interprétatives où les différentes couches du sous-sol sont caractérisées par leur vitesse sismique de compression (V_p).

L'analyse des données de sismique réfraction de ce rapport a été réalisée par la méthode d'interprétation dite des délais avec le programme SIPT2 de RimRock geophysics dont une description détaillée est donnée dans J.M. Scott, 1973¹.

La **sismique transparence** est généralement utilisée entre forages ou entre forage et surface. Les ondes sismiques générées en plusieurs points régulièrement disposés (en forage généralement) sont enregistrées le long d'un dispositif de récepteurs régulièrement espacés en forage ou/et en surface. L'analyse par méthode tomographique des temps de trajet (arrivées premières) des ondes sismiques conduit à définir la distribution des vitesses sismiques dans le plan contenant les dispositifs émetteurs et récepteurs. L'analyse peut être réalisée selon des raies droites (trajets directs) dans des cas simples mais l'analyse en raies courbes (trajets réfractés) est nécessaire dans la plupart des cas. Les différents terrains ou couches recoupés par ce plan sont ainsi définis par leurs vitesses sismiques de compression (V_p).

L'inversion tomographique des données de sismique transparence a été réalisée grâce au logiciel MIGRATOM de l'USBM dont une description détaillée est donnée par M.J. Jackson et D.R. Tweeton 1994.²

2.2. MOYENS MIS EN ŒUVRE

Les investigations de terrain se sont déroulées du 13 au 24 juin 2000.

¹ J.M. Scott, 1973. Seismic refraction modelling by computer, Geophysics, vol. 38, No. 2.

² M.J. Jackson, D.R. Tweeton, 1994. MIGRATOM - Geophysical tomography using Wavefront Migration and Fuzzy Constraints, USBM Report of investigations 9497.

2.2.1. Personnel

- 1 ingénieur géophysicien,
- 1 technicien géophysicien.

2.2.2. Équipement

a) Sismique en transparence

- 3 enregistreurs sismique Geometrics Strataview 48 traces, BRGM SM24 24 traces, ABEM Terraloc III 24 traces ;
- 1 boîte de tir Saturne ;
- 1 système de déclenchement simultané BRGM ;
- 4 câbles sismiques 12 traces, 5 m entre trace ;
- 2 câbles sismiques 24 traces, 5 m entre trace ;
- 1 micro-ordinateur portable ;
- 100 détonateurs, 400 renforçateurs ;
- 2 véhicules.

b) Sismique réfraction

- 1 enregistreur sismique Geometrics Strataview 48 traces ;
- 2 câbles sismiques 24 traces, 5 m entre trace ;
- 1 source chute de poids ABEM ;
- 1 source chute de poids Wadimpack ;
- 1 micro-ordinateur portable ;
- 2 véhicules.

2.3. TRAVAUX RÉALISÉS

2.3.1. Sismique réfraction

Les dispositifs sismique-réfraction ont été mesurés sur cinq profils implantés le long des rues qui quadrillent le coteau sud de la vailleuse. Les dispositifs d'une longueur de 235 m (48 géophones, 5 m entre trace) ont fait l'objet de 7 à 10 tirs. Les tirs étaient réalisés au moyen de chutes de poids (fig. 3) qui permettent de travailler en zone péri-urbaine ou urbaine avec un impact minimal sur l'environnement tout en obtenant une émission sismique suffisante. Deux équipements ont été utilisés :

- la chute de poids Wakimpack de la société Geostock ;
- la chute de poids Terrasource de la société EMCI.

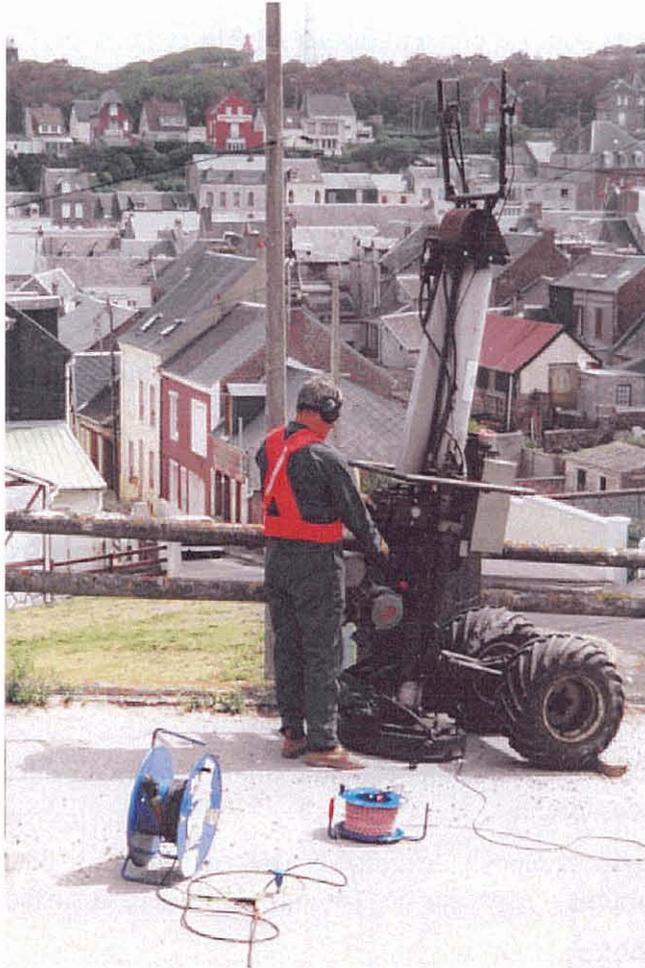


Fig. 3 - Source chute de poids Wakimpack en action sur le profil sismique réfraction P5.

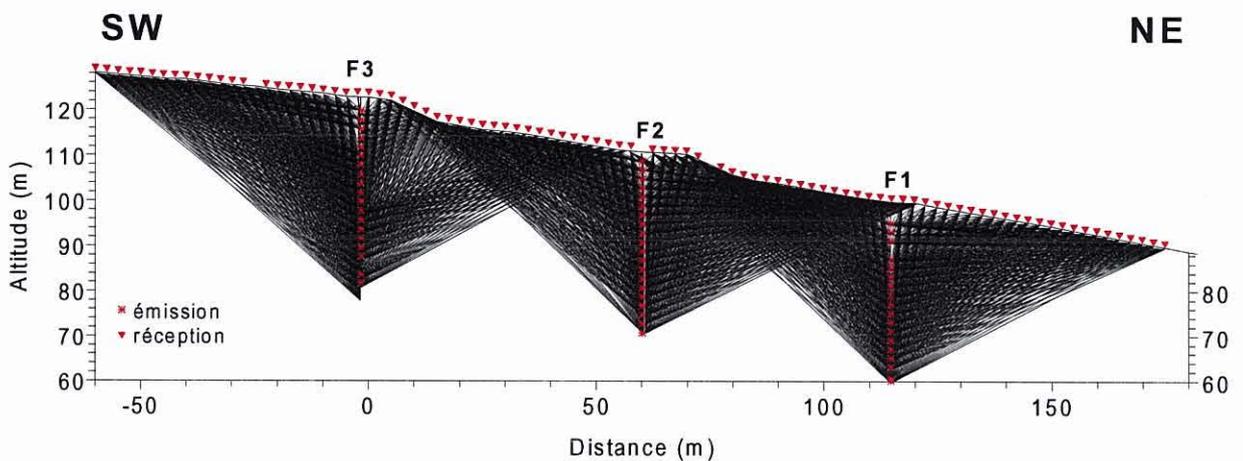


Fig. 4 - Dispositif sismique transparence rue Sainte-Marie avec représentations des raies droits.

Ces deux équipements sont de conception semblable et leurs performances théoriques sont proches. Toutefois la chute de poids Terrasource nouvellement conçue avait, semble-t-il, été insuffisamment testée et le système d'attache du marteau était hors d'état après dix tirs environ. Après avoir essayé deux panes et réalisé une réparation cette source fut remplacée par la source Wakimpack qui permis d'achever le travail.

L'inversion des données des dromochroniques (ann. 2) a été réalisée par la méthode des délais grâce au programme SIPT2, l'analyse des vitesses ayant été réalisée par la « méthode graphique des équerres » et une fonction d'analyse de vitesse moyennant les temps d'arrivée des tirs inverses et directs du réfracteur principal.

2.3.2. Sismique en transparence

Les mesures de sismique en transparence ont été réalisées à partir de trois forages réalisés, par la société Algade, rue Sainte-Marie. Le dispositif de mesure est composé d'émetteurs en forage et de récepteurs en surface selon le schéma de la figure 4. Les points d'émission en forage sont espacés de 2 m en moyenne. Les récepteurs sont quant à eux distants de 2,5 m.

Plusieurs dispositifs de tir et de déclenchement ont été testés dans le fond du forage F1. Le dispositif retenu comprend :

- un carottier sismique composé de charges (des détonateurs haute intensité et 4 à 5 renforceurs sismiques) espacées de 2 m entre le fond et la surface du forage ;
- une boîte de tir Saturne ;
- une boucle électromagnétique (système ABEM) entourant la ligne de tir, captant le pulse électrique délivré par la boîte de tir ;
- une boîte de distribution délivrant le signal de la boucle électromagnétique aux trois enregistreurs sismiques.

L'enregistrement a été réalisé sur une durée de 100 à 128 ms avec un pas d'échantillonnage de 50 à 400 micro-secondes, suivant les enregistreurs.

Les pointés des arrivées premières sont présentés en annexe 1. La précision globale telle qu'elle apparaît sur les diagrammes temps-distance de l'annexe 1 est estimée meilleure que 1 ms pour la plupart des pointés. Quelques tirs du dispositif NW-SE du forage F2 ainsi qu'une partie des tirs les plus superficiels du dispositif nord-est du forage F3, qui présentaient des pointés douteux pour les récepteurs les plus distants, ont été écartés du jeu de données. La synchronisation des enregistrements des trois différents enregistreurs est estimée (par comparaison des temps des arrivées premières aux géophones proximaux) également inférieure ou égale à 1 ms.

L'écart entre valeurs mesurées et calculées en dessous duquel les résultats de l'inversion tomographique sont considérés comme satisfaisants a été choisi en conséquence à une valeur RMS de 2 ms.

Etant donné que le milieu étudié (craie altérée) est stratifié et globalement horizontal, le dispositif de mesure choisi se révèle mal adapté car très peu de trajets permettent de caractériser les vitesses des couches et d'autant moins que les couches sont plus profondes. Dans ces conditions, l'analyse en raies droites est tout à fait inadaptée car quasiment tous les trajets de propagation subissent des réfractions aux interfaces des couches.

Aussi l'inversion a-t-elle été réalisée selon des raies courbes avec un modèle de départ stratifié identique pour tous les jeux de données. Ce modèle, présenté dans le tableau ci-dessous, est inspiré des résultats de sismique réfraction.

Profondeur (m)	Vitesse (m/s)
0-6	500
6-9	700
9-15	950
15-21	1 200
21-27	1 500
27-33	1 800
33-42	2 300

La résolution est proportionnelle à la zone de Fresnel, $Z = \frac{\sqrt{Lv}}{f}$ qui est évaluée, considérant une fréquence des signaux sismiques, f de l'ordre de 200 Hz, une vitesse moyenne, v de 1 000 m/s et une distance émetteur-récepteur, L de 50 à 15 m. D'après Valle et Zanzi (1996)³ une maille entre $Z/3$ et $Z/5$ est appropriée comme elle évite l'aliasing d'une maille trop large et le sur-maillage où des nœuds ne seraient reconnus par aucune raie. La maille des modèles de vitesses utilisés dans l'inversion a été choisi en conséquence entre 2,5 et 5 m suivant les jeux de données.

De 5 à 10 itérations ont généralement été nécessaires pour atteindre des écarts RMS de moins de 2 ms entre valeurs mesurées et calculées. L'absence de trajets horizontaux dans les jeux de données limite les performances de la méthode et est sans doute responsable d'un biais qui conduit systématiquement à une augmentation de la vitesse le long des forages, par rapport au reste du panneau de vitesse.

Les tomographies, résultats des panneaux NW-SE ne sont pas présentées car un défaut, non résolu, du logiciel MIGRATOM a empêché, au moins partiellement, leur calcul.

³ Valle S., Zanzi L., 1996. Resolution in radar tomography for wall or pillar inspection. Proceedings, 6th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR'96), Sendai, Japan.

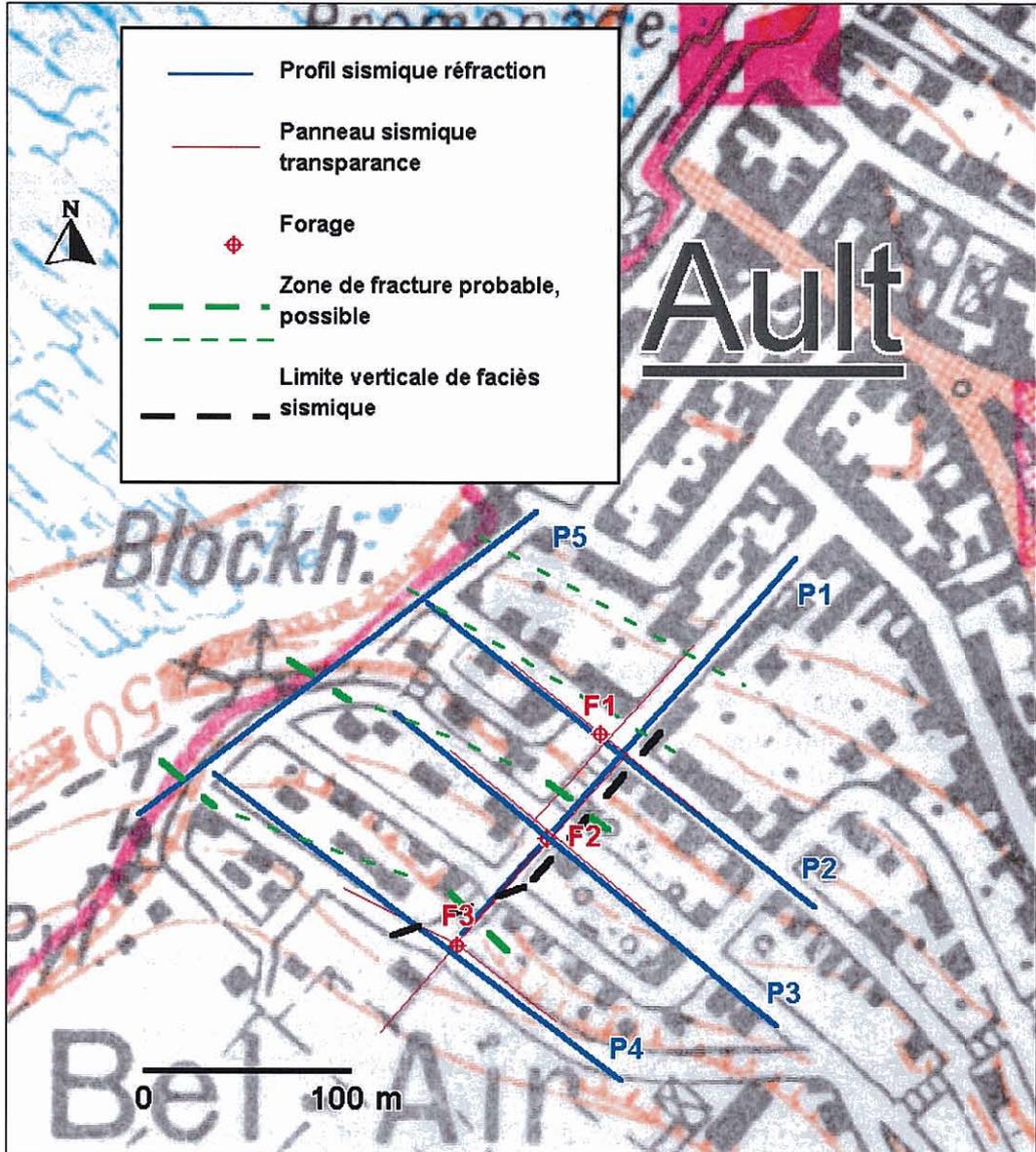


Fig. 5 - Synthèse des résultats.

3. Résultats

Les résultats sont présentés sur les profils des planches 1 (profils SW-NE = rue Sainte-Marie) et 2 (profils NW-SE) ainsi que sur la figure 5.

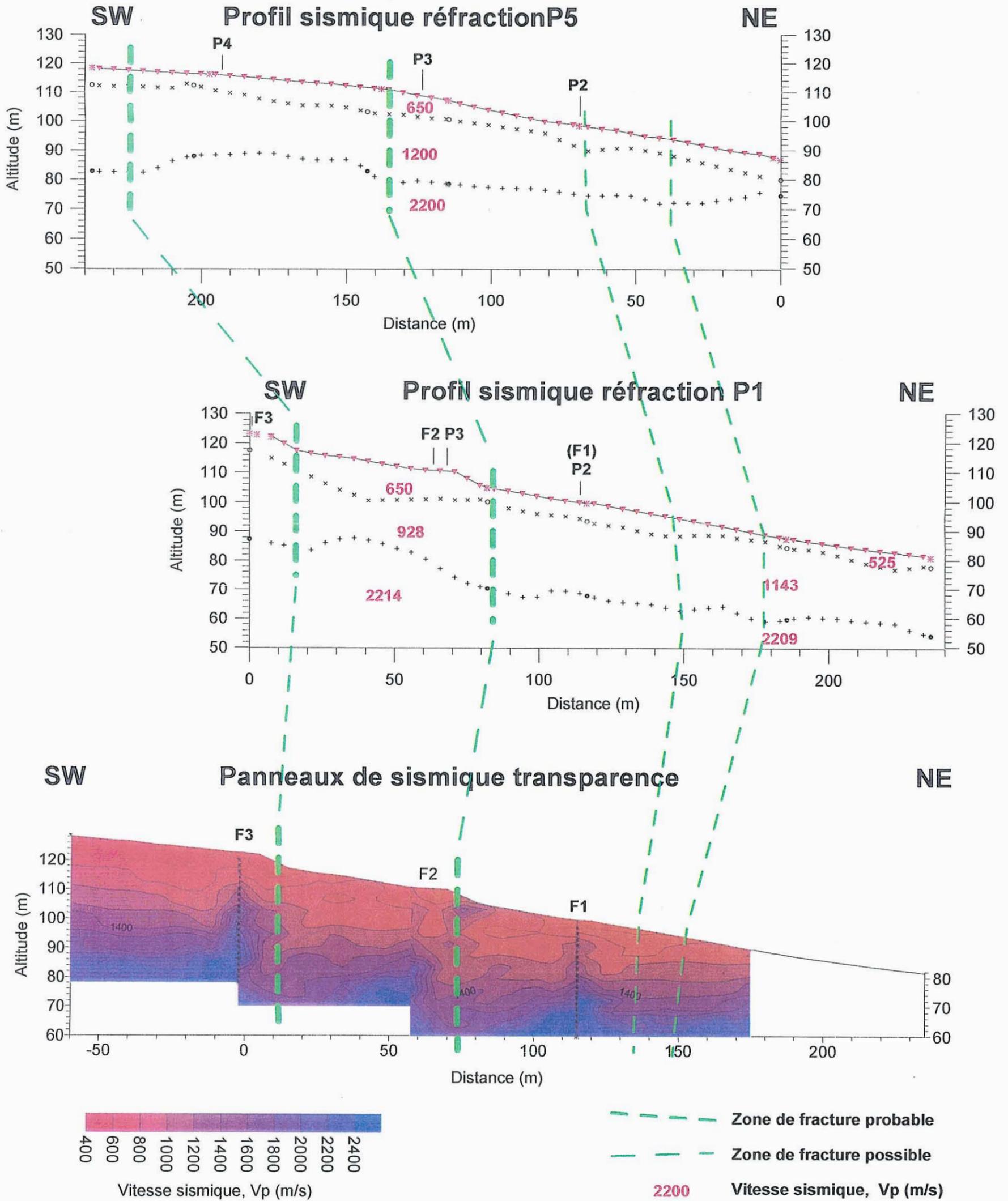
Les **profils sismiques réfraction** ont été interprétés en 3 couches. Le réfracteur principal (au toit de la couche la plus profonde) est caractérisé par une vitesse remarquablement constante et comprise entre 2 200 et 2 300 m/s. Ce niveau est attribué à la craie saine ou peu altérée. Elle est couverte de deux niveaux caractérisés respectivement par des vitesses sismiques comprises entre 900 et 1 400 m/s (couche intermédiaire) et 500 et 950 m/s (couche superficielle). Ces niveaux sont attribués à la craie altérée et ses produits d'altérations (argile à silex). L'épaisseur de la couverture varie d'une quinzaine de mètres en bas de coteau (P5) à 40 m en haut (P4) conformément au schéma d'une altération uniforme entaillée par l'érosion. Des dépressions du toit du réfracteur principal, particulièrement marquées à l'aval de F2 et de F3 (profil 1), apparaissent néanmoins au droit de ressauts dans la topographie. Elles sont interprétées comme des zones de fracture sub-verticales affectant le massif crayeux. L'interpolation de ces dépressions entre les profils P1 et P5 dessinent une direction grossièrement SE-NW (fig. 5).

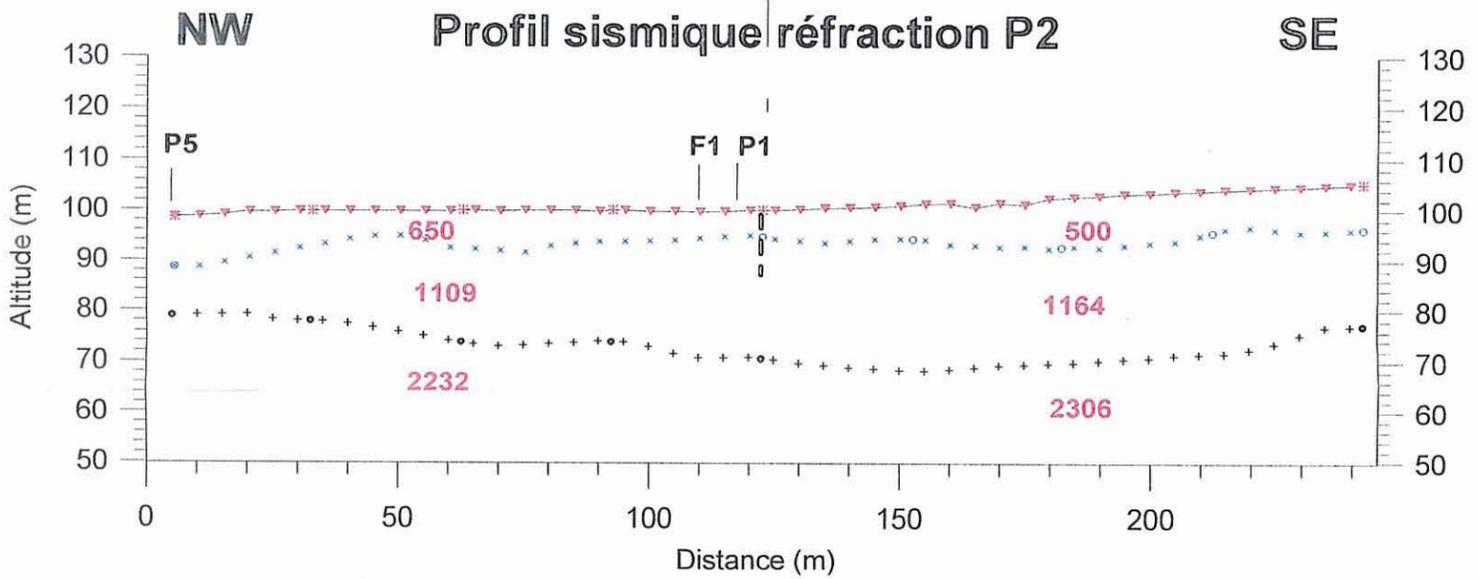
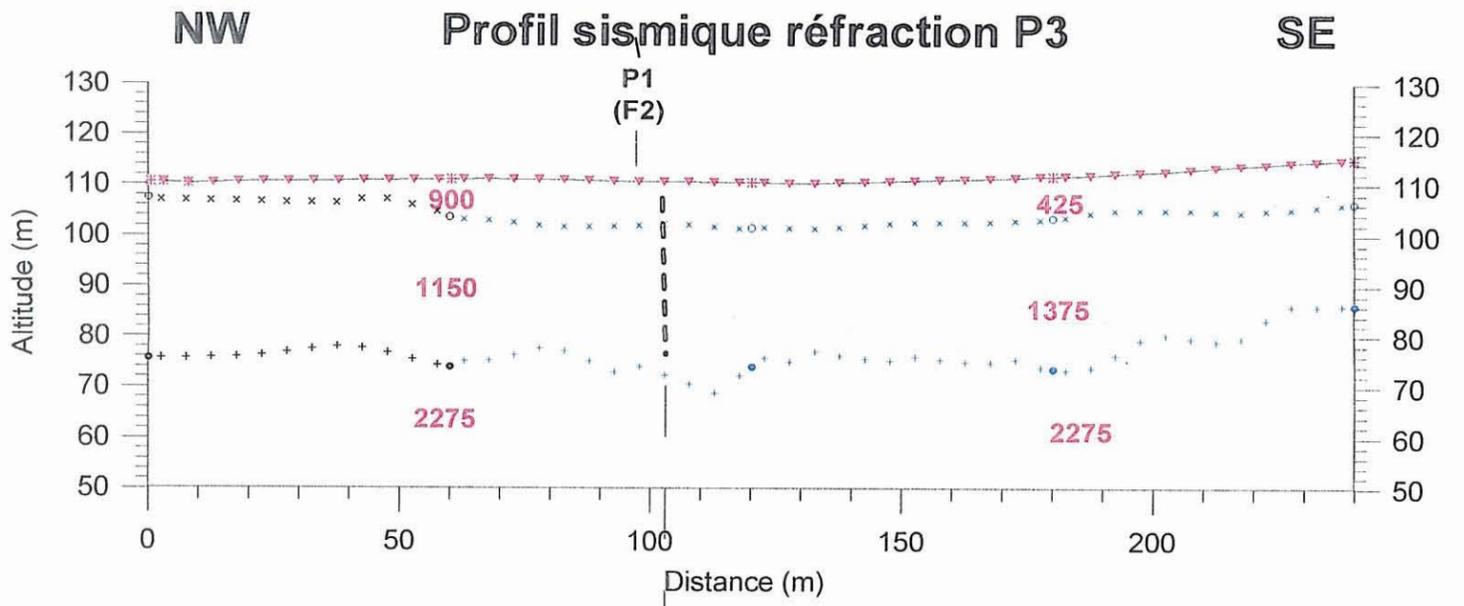
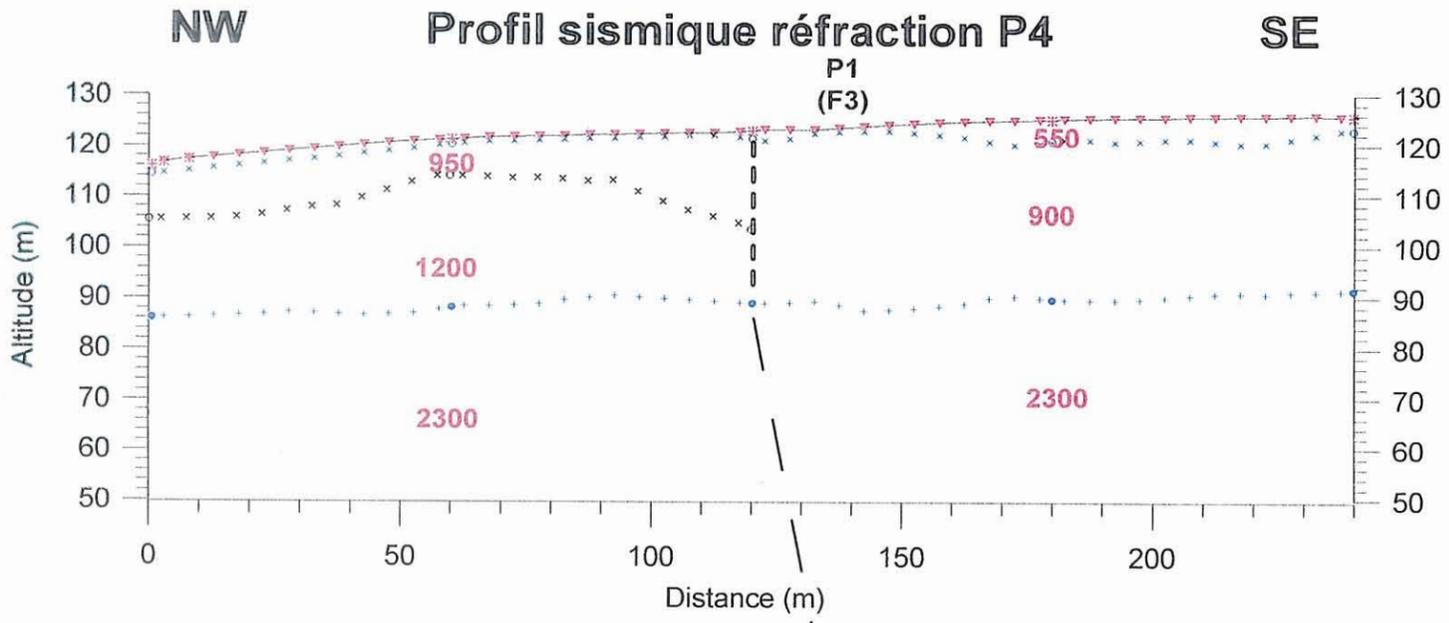
On n'observe pas de diminution des vitesses sismiques en direction de la falaise mais une nette augmentation des vitesses dans la couche superficielle. Une limite bien marquée d'orientation SW-NE sépare deux zones dans la couche superficielle (pl. 2). Au nord de cette limite les terrains superficiels sont caractérisés par des vitesses supérieures à 800 m/s au nord et par des vitesses inférieures à 600 m/s au sud (fig. 5). Cette variation est attribuée à une variation latérale de faciès ou une altération variable de la craie. Des investigations directes (pelle mécanique, tarière,...) sont nécessaires pour préciser cette interprétation.

L'inversion tomographique des **panneaux de sismique transparence** utilise un modèle de vitesse continu. Les panneaux de vitesse, résultats d'inversion montrent une variation graduelle de vitesse entre 500 m/s en surface et 2 300 m/s en profondeur en cohérence avec les résultats de sismique réfraction. Ils mettent en évidence des zones de moindre vitesse au niveau des ressauts topographiques de la rue Ste Marie. Ces zones de moindre vitesse sont cohérentes avec les dépressions au toit du réfracteur principal, décrites plus haut.

Les deux interprétations selon un modèle de vitesse, stratifié, discontinu (interprétation sismique réfraction) ou selon un modèle de vitesse, continu (interprétation tomographique des panneaux sismiques transparence) donnent des résultats très comparables :

- les vitesses sont étagées entre 500 m/s en surface et 2 300 m/s en profondeur ;
- la craie saine ou peu altérée définie par les vitesses supérieures à 2 000 m/s à des profondeurs comparables: environ 25 m à l'aval de F1 et 40 m en tête de coteau sur le profil de la rue Sainte-Marie ;
- les zones de plus faible vitesse des panneaux tomographiques sont corrélées avec les dépressions au toit du réfracteur principal des profils de sismique réfraction.





--- Limite verticale de faciès sismique

2275 Vitesse sismique, V_p (m/s)

Ces deux modèles sont équivalents d'un point de vue sismique, c'est-à-dire qu'ils s'appliquent aussi bien l'un que l'autre à rendre compte des mesures sismiques réalisées.

Considérant que l'altération est un phénomène progressif affectant progressivement le massif crayeux, les modèles continus faisant varier graduellement les vitesses apparaissent les mieux adaptés. Toutefois, les argiles à silex, produit de l'altération de la craie, sont en contact franc avec la craie altérée sous-jacente et dans ce cas c'est un modèle en couches de vitesses contrastées qui semble le mieux adapté. Une analyse lithologique détaillée alliée à des mesures sismiques en forage permettrait de définir quel est le modèle permettant de mieux rendre compte des caractéristiques du massif crayeux.

4. Conclusion

Le test des méthodes sismique réfraction et sismique transparence dans la partie sud de la ville d'Ault, en bordure de la falaise de craie a permis de mettre en évidence les structures suivantes :

- selon une direction SE-NW, sont mises en évidence des zones de faiblesse du massif crayeux qui sont attribuées à des zones de fracture ;
- un contact marqué entre des terrains plus rapides au nord (en direction de la falaise) et plus lents au sud dans la couche superficielle (jusqu'à dix mètres de profondeur). Cette variation latérale et localisée de faciès sismique est interprétée, en l'absence d'information complémentaire, comme une variation de faciès ou d'altération de la craie.

Aucune diminution des vitesses sismiques, tel qu'attendu du fait de la décompression des terrains, n'est observée en direction de la falaise. L'épaisseur d'altération, faible en fond de vallée et importante en haut de coteau est, en revanche, conforme au schéma d'une altération uniforme entaillée par l'érosion.

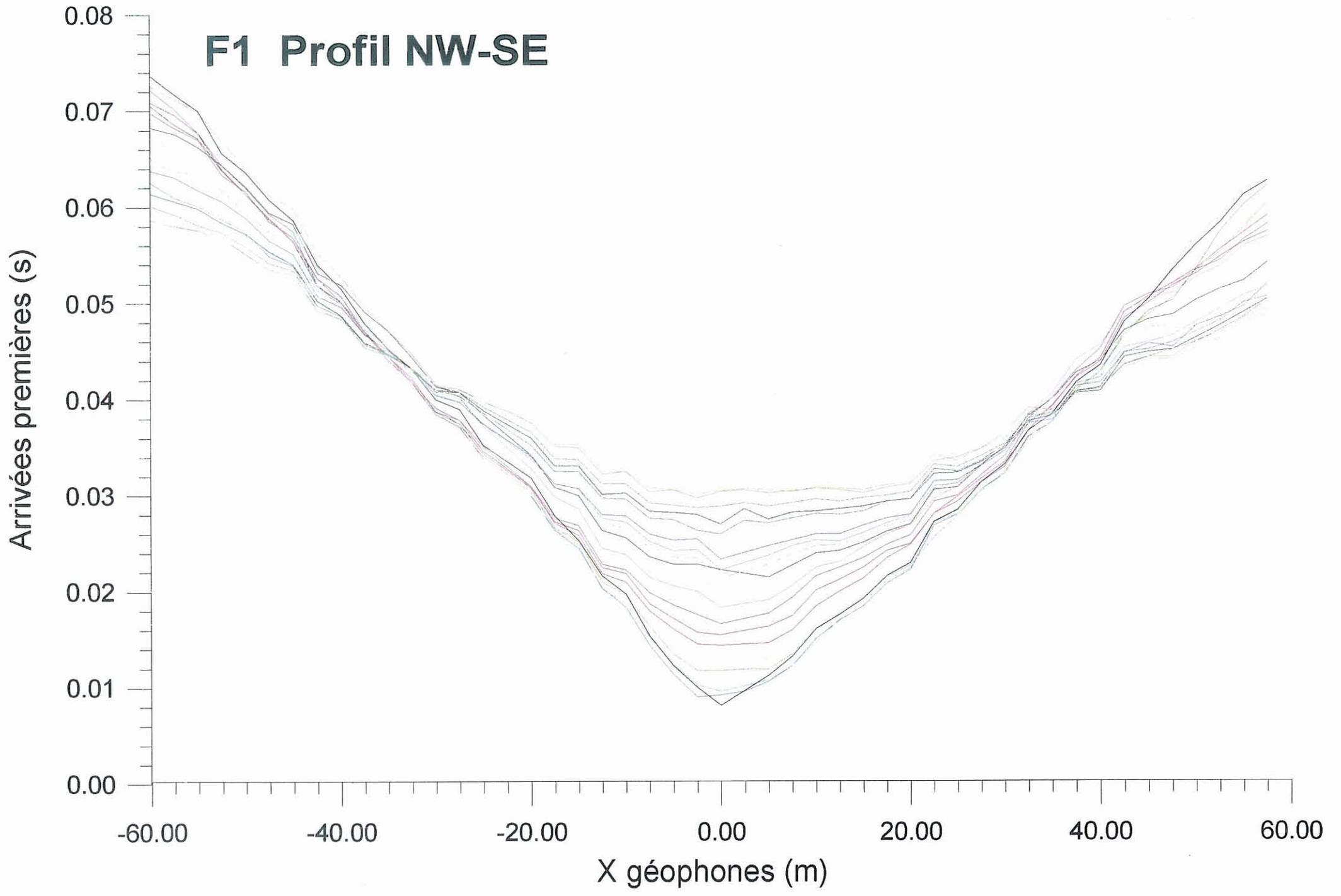
Les méthodes utilisées donnent des résultats en parfaite cohérence. Considérant le rapport de 1 à 5 entre les prix de revient des deux méthodes, la sismique réfraction plus facile à mettre en oeuvre et plus rapide à compiler est recommandée même si les zones de faiblesse du massif crayeux sont plus apparentes sur les panneaux de sismique transparence.

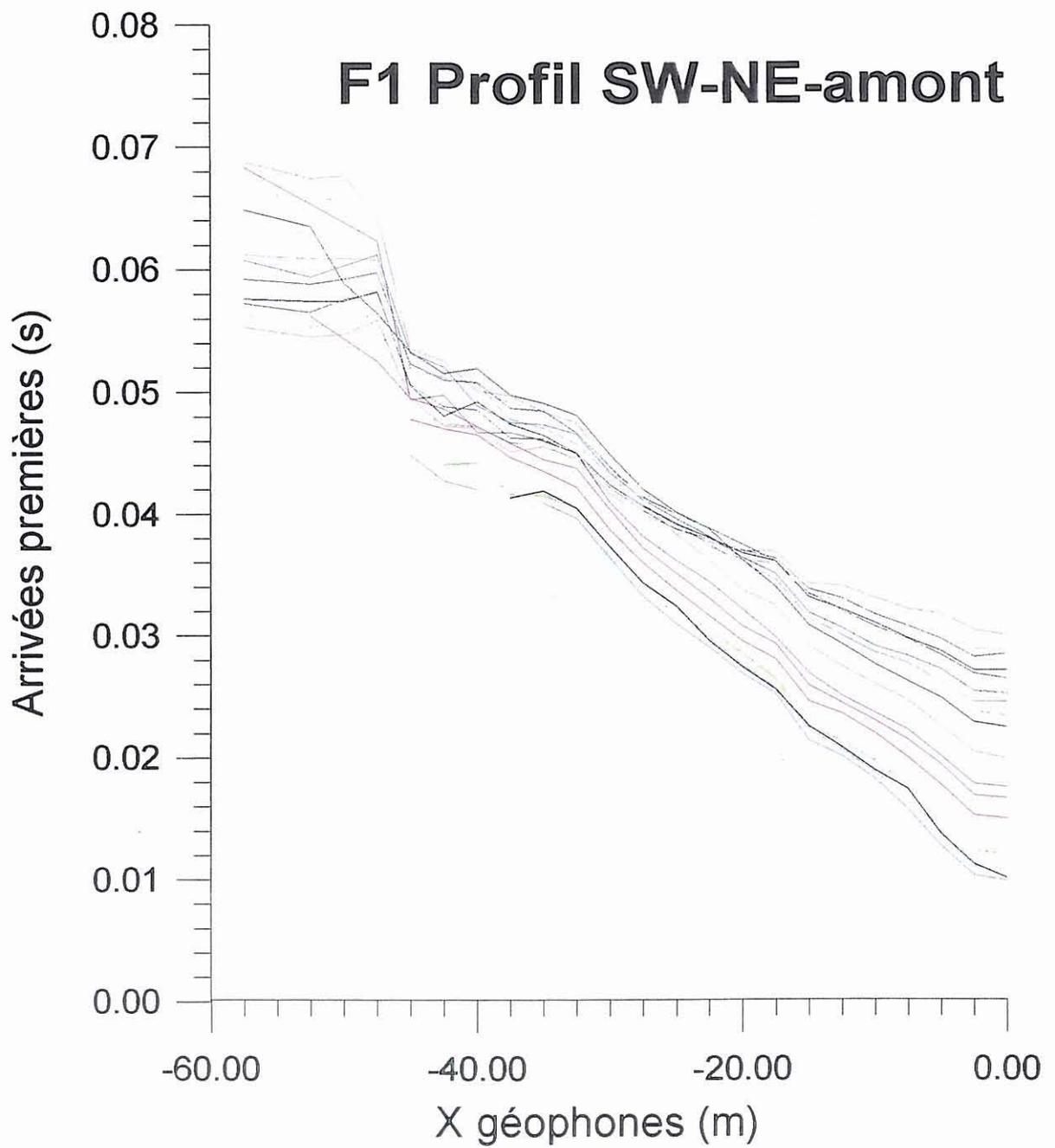
L'efficacité de la méthode sismique réfraction est amoindrie en bord de falaise du fait de l'impossibilité de réaliser les tirs à offset lointains sur les dispositifs perpendiculaires à la falaise. Il convient de pallier ce manque par la réalisation de plusieurs tirs sur dispositif ou à offset proches, côté falaise et par des dispositifs parallèles au bord de falaise.

Si toutefois la méthode sismique transparence devait être utilisée (pour étudier, en détail, des structures d'extension limitée par exemple) les meilleurs résultats seraient obtenus avec un dispositif forage-surface et forage-forage. Le dispositif forage-surface seul, tel qu'utilisé ici, est mal adapté à l'étude d'un terrain essentiellement stratifié.

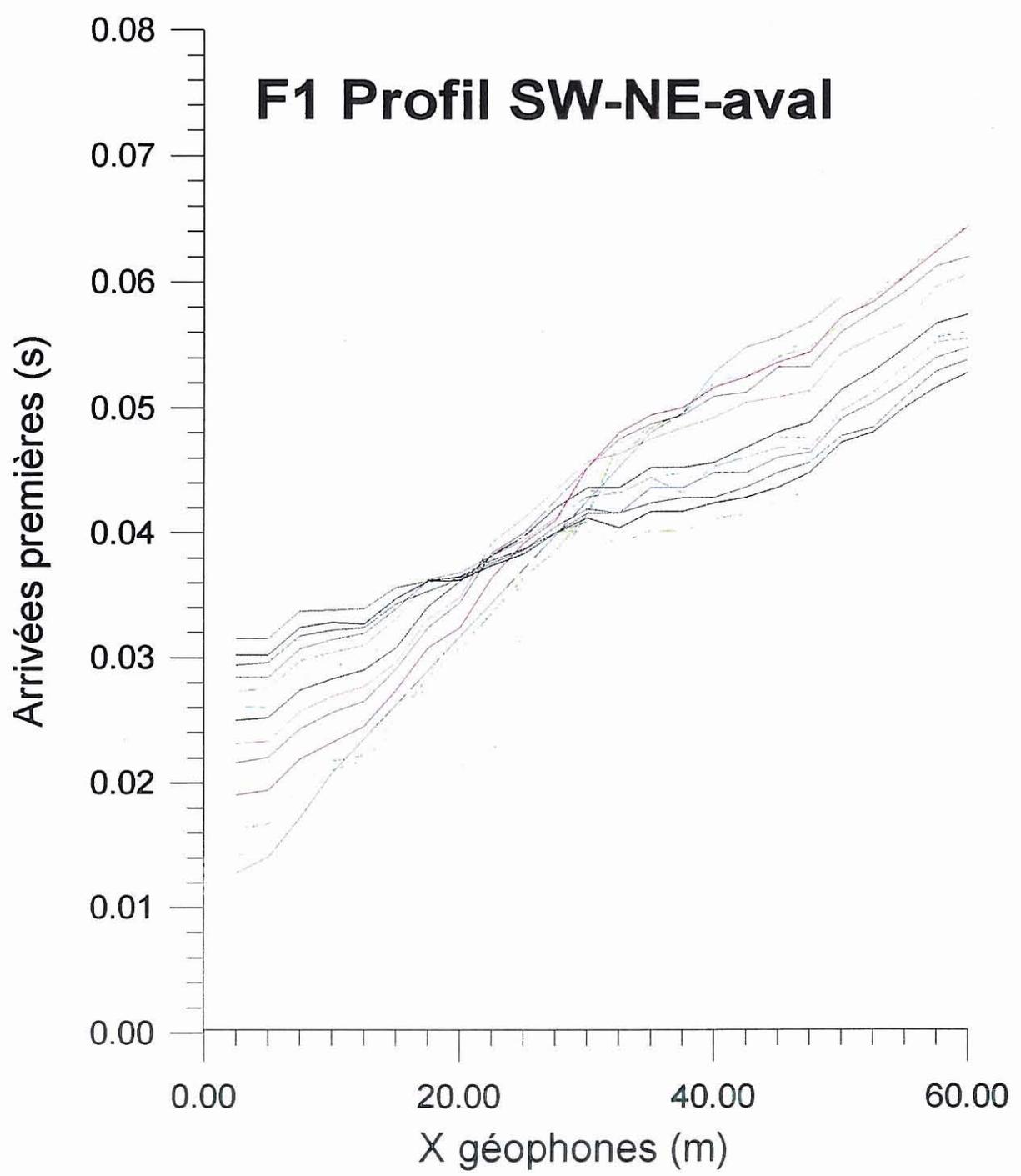
ANNEXE 1

Courbes temps-distance des arrivées premières de sismique transparence

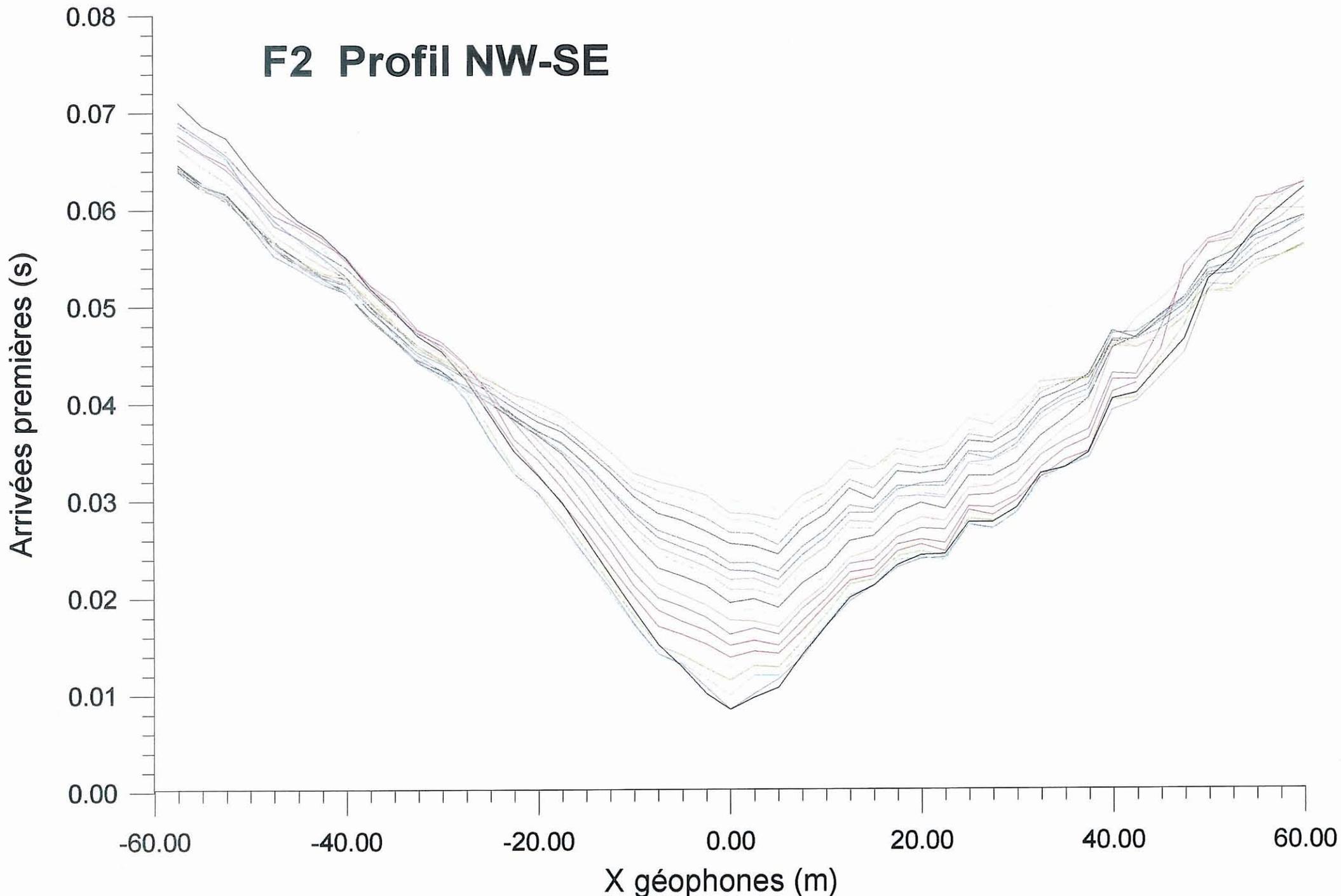




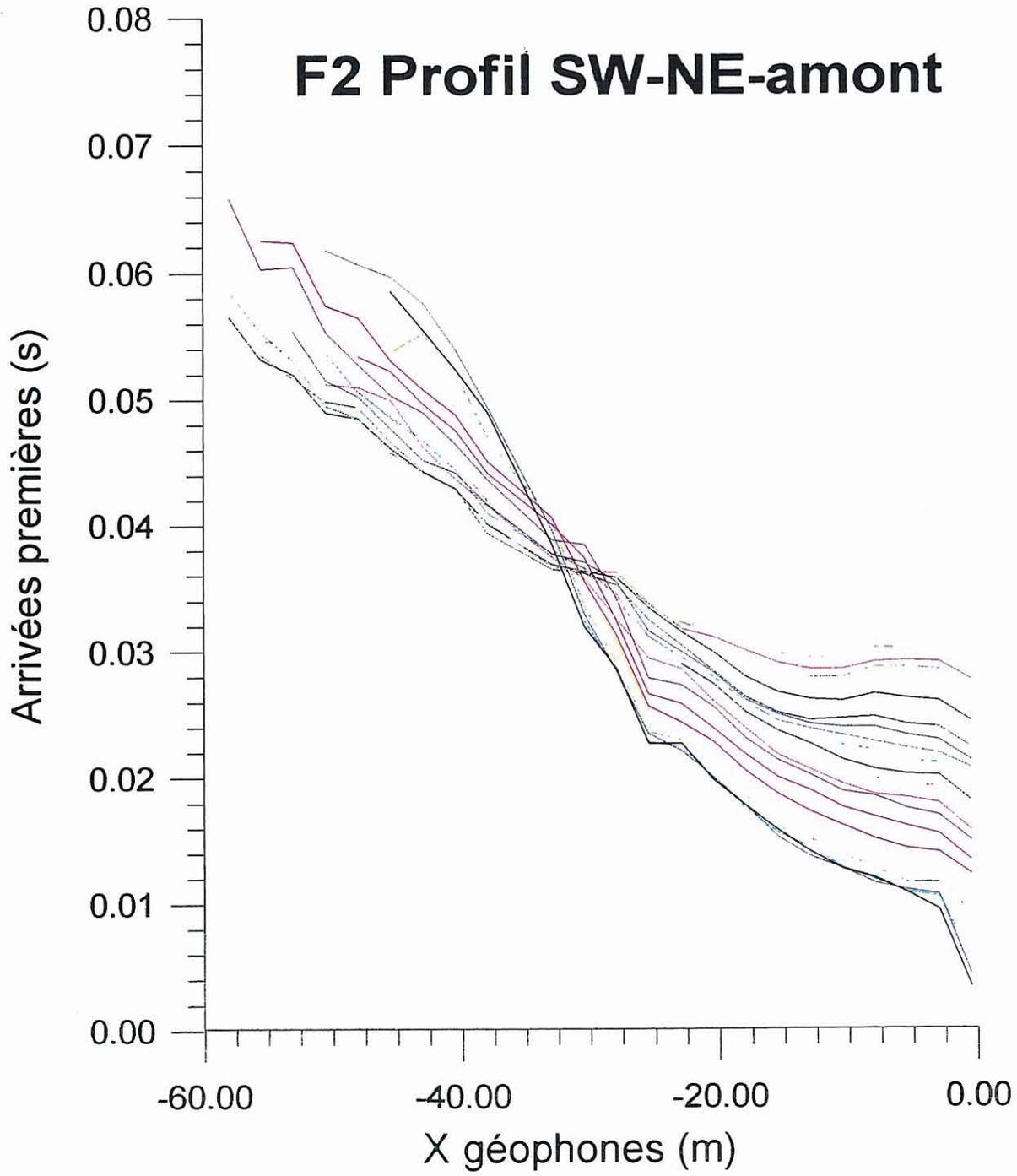
F1 Profil SW-NE-aval

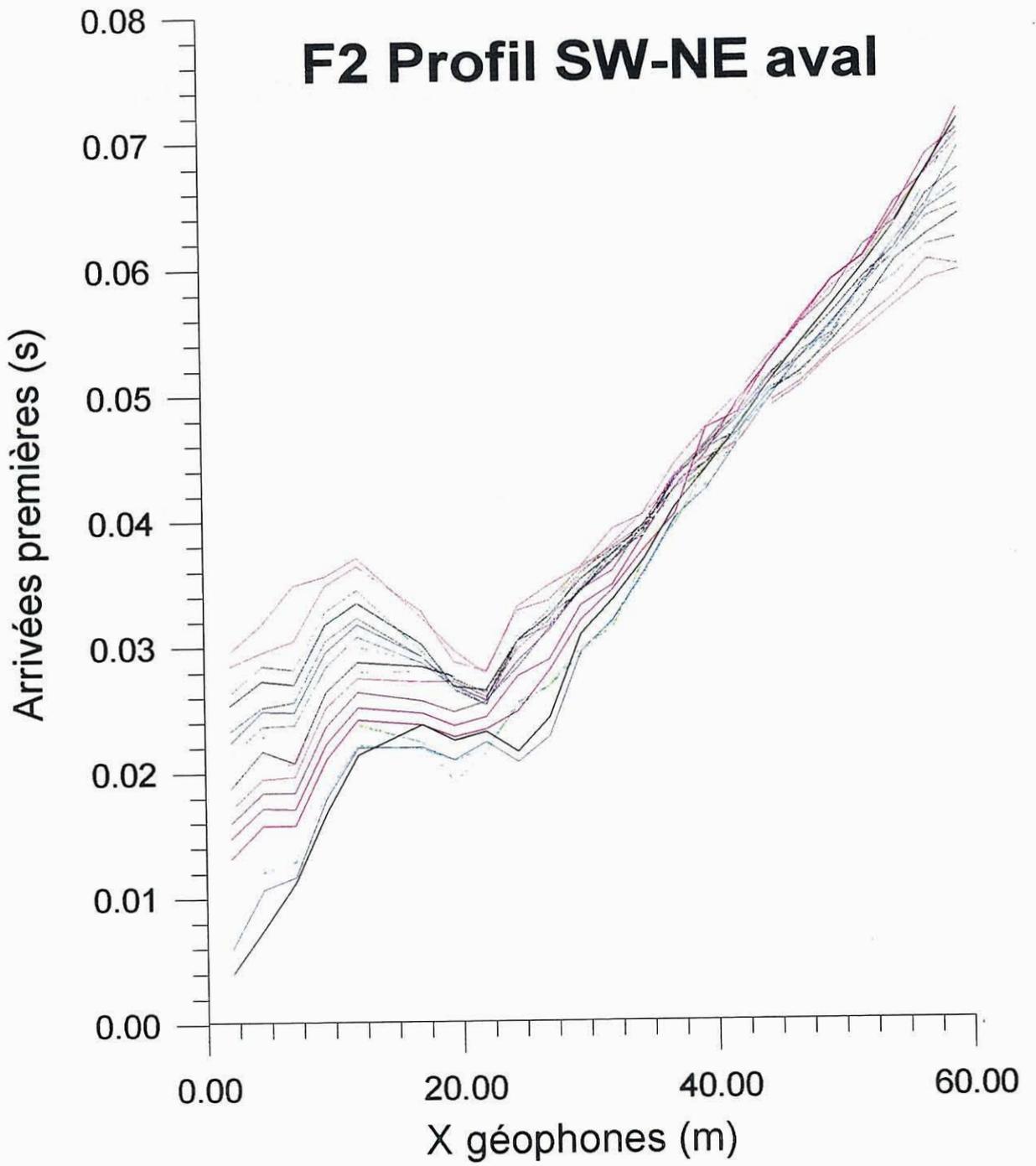


F2 Profil NW-SE



F2 Profil SW-NE-amont

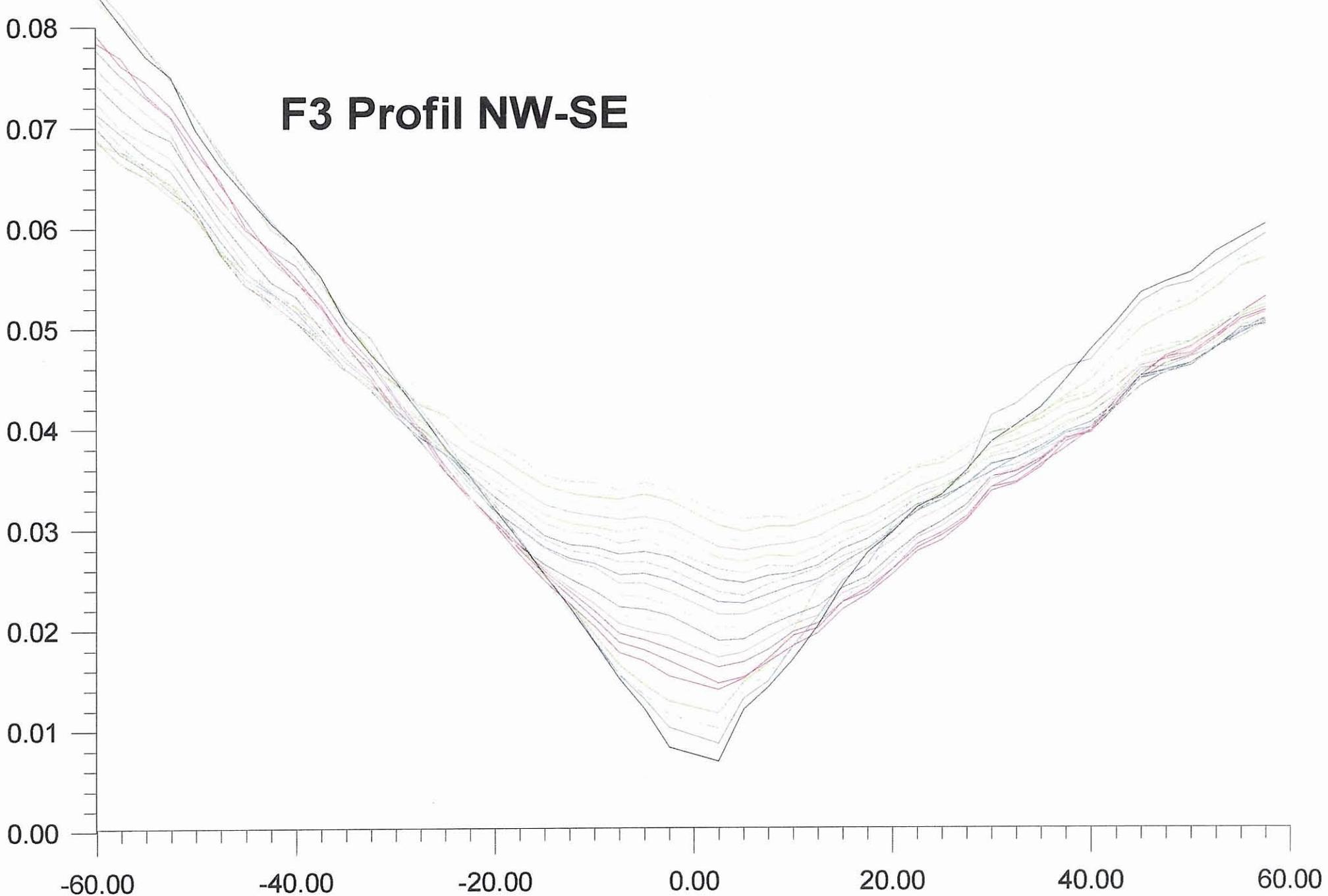


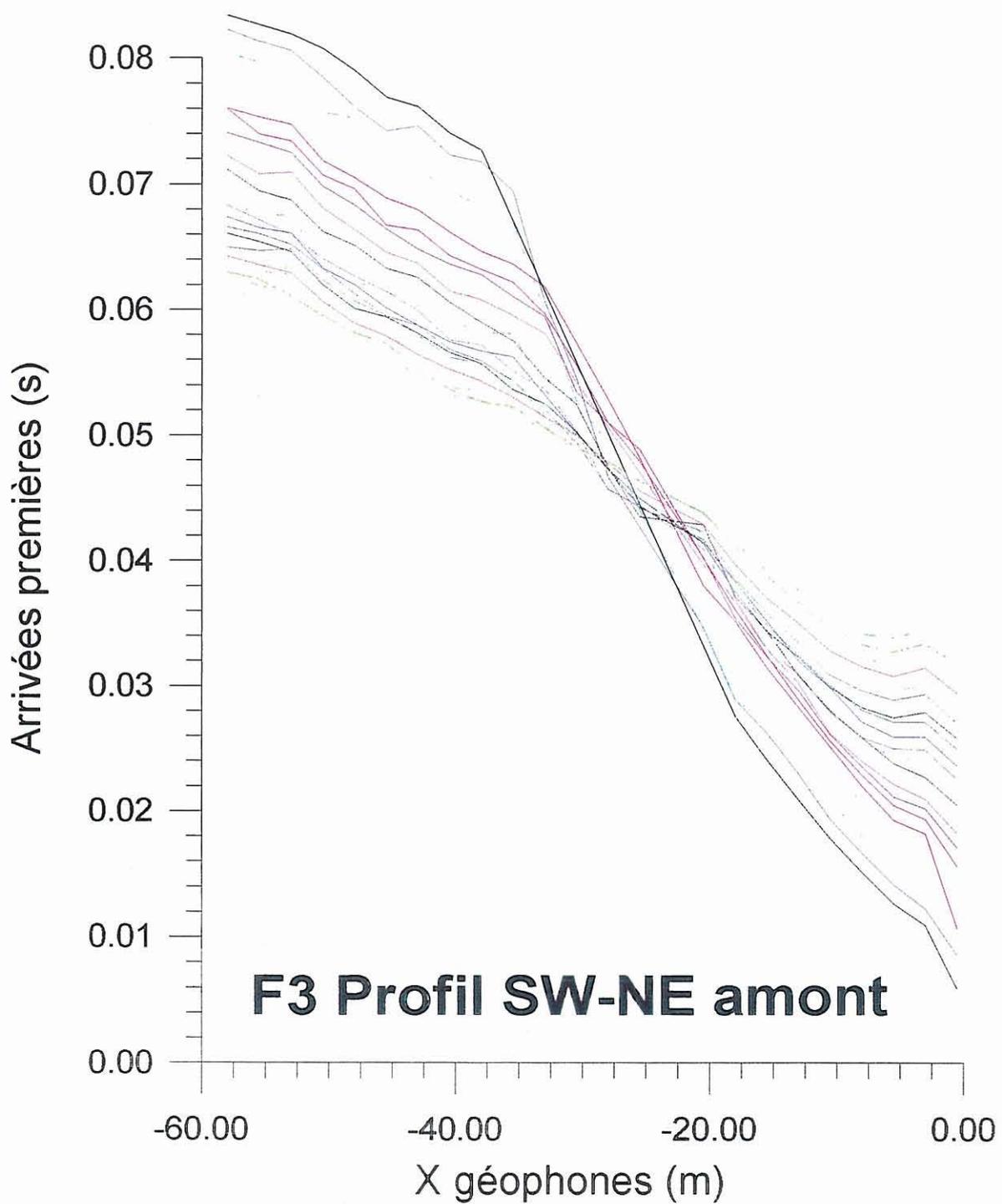


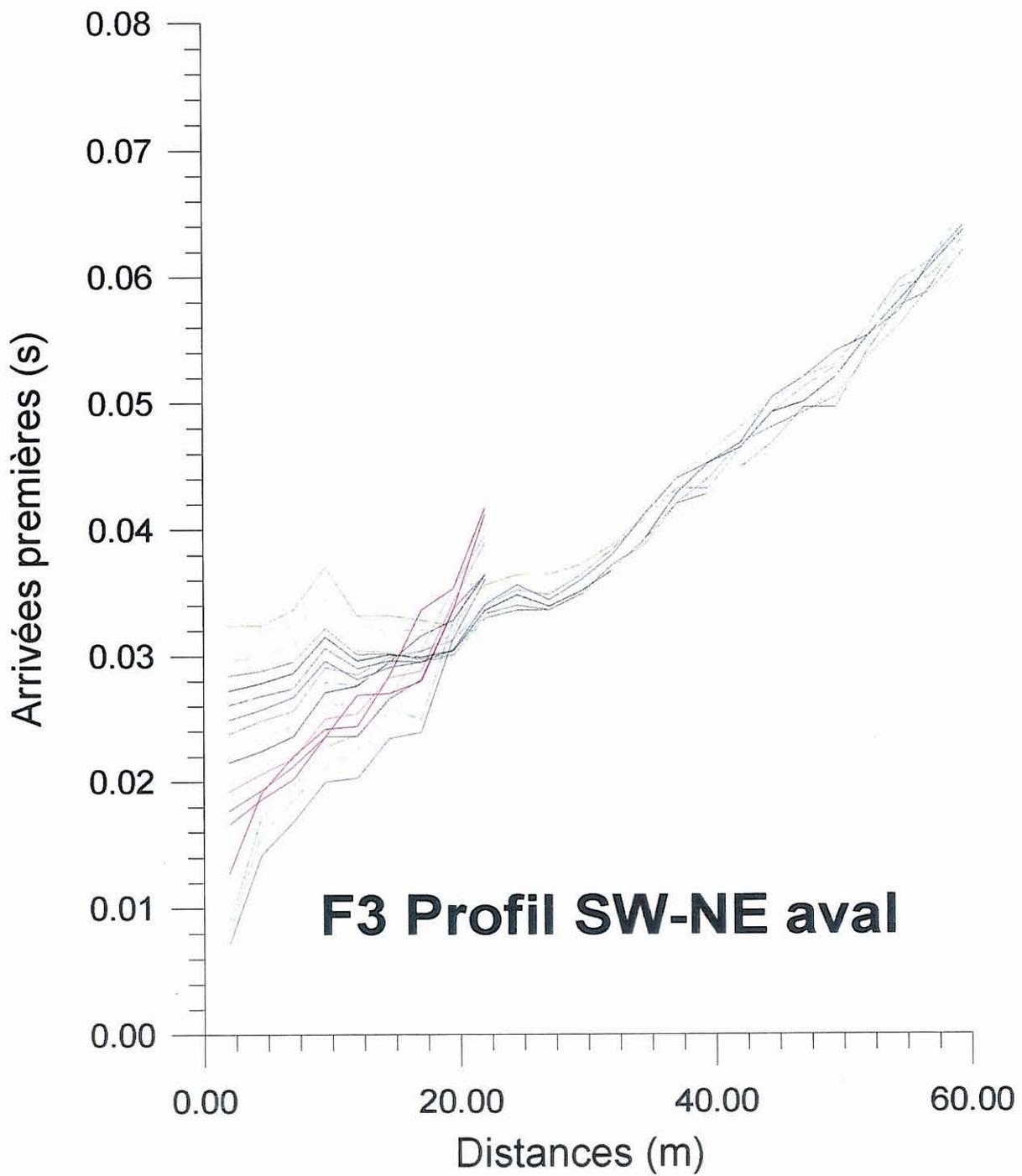
F3 Profil NW-SE

Arrivées premières (s)

X géophones (m)

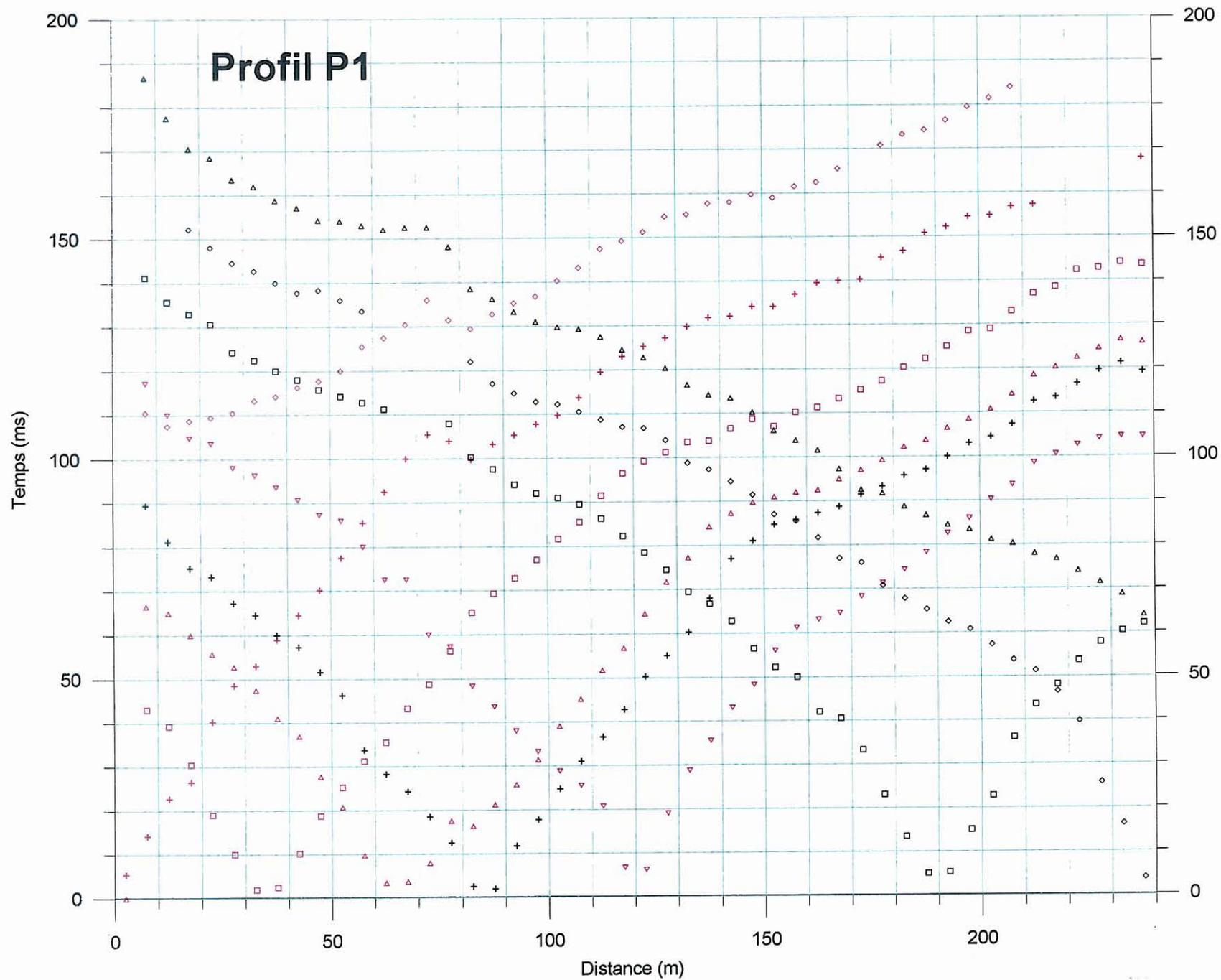


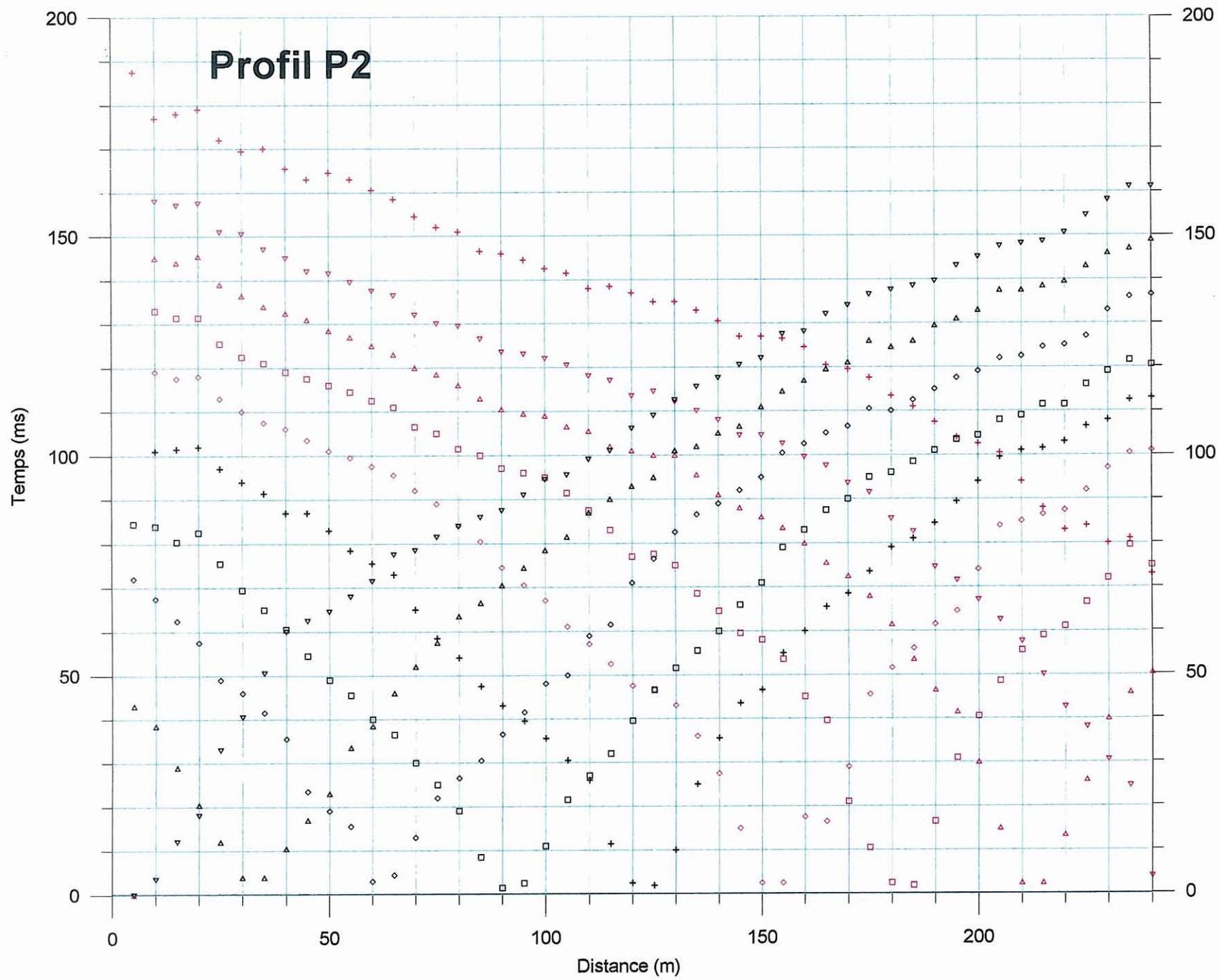


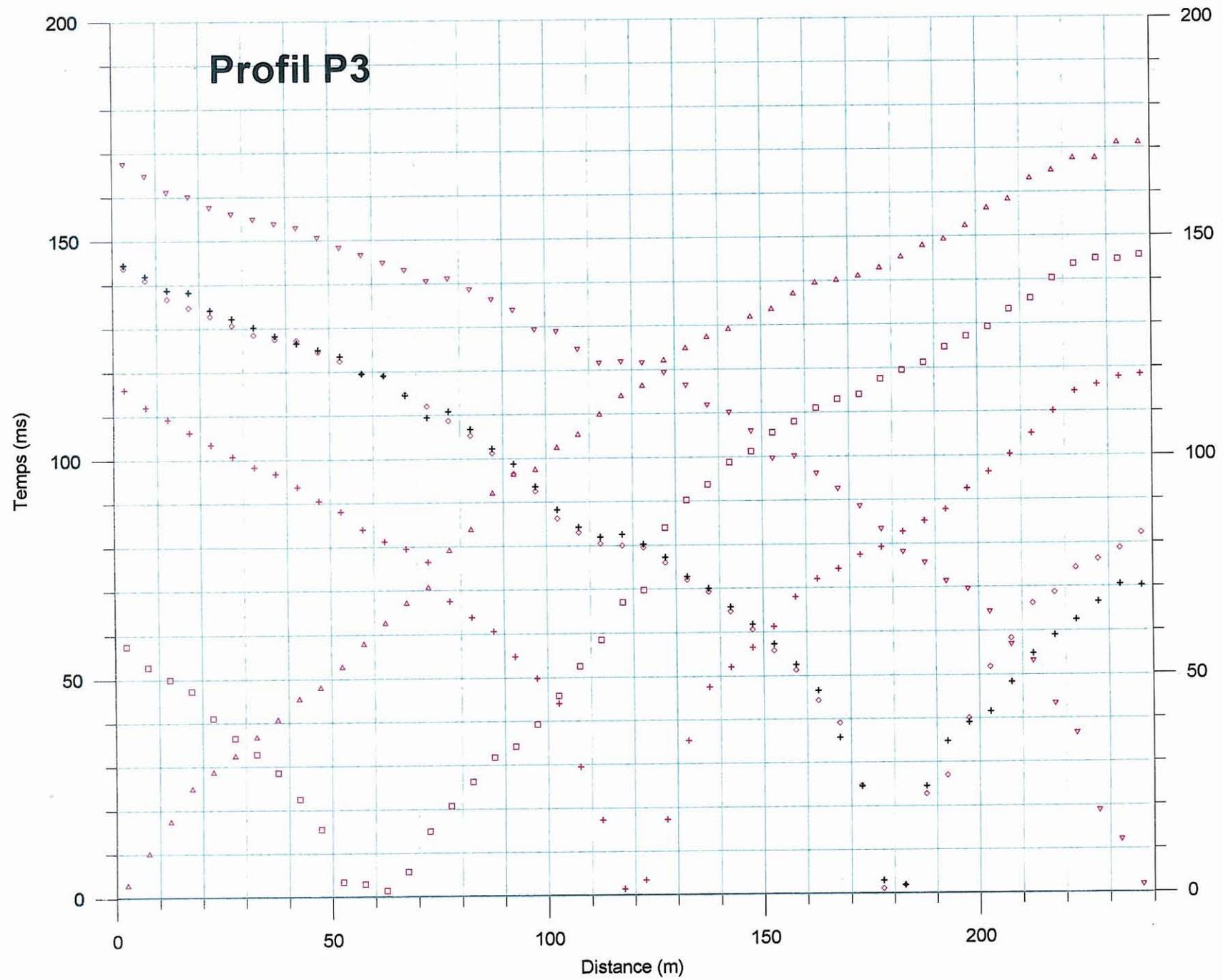


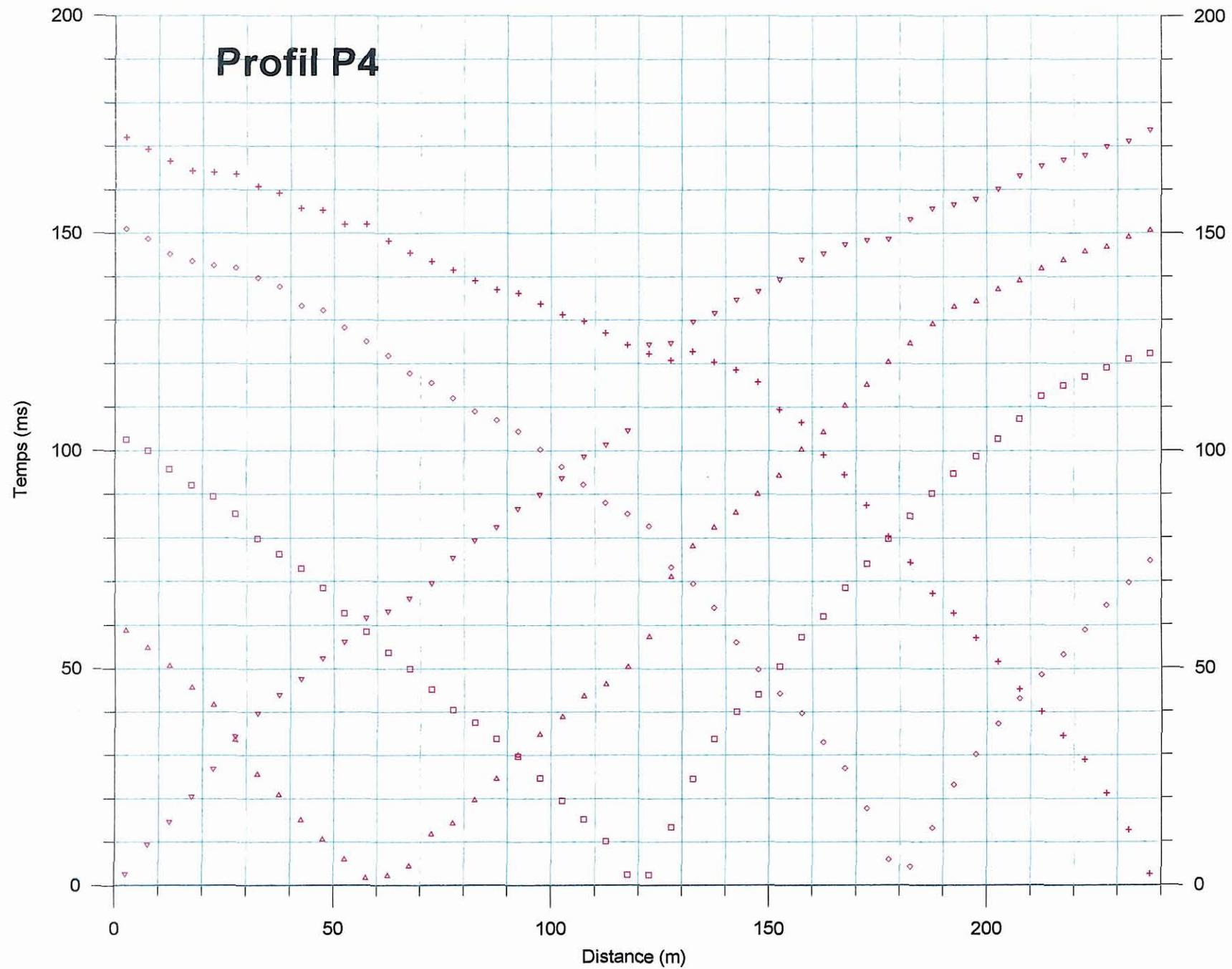
ANNEXE 2

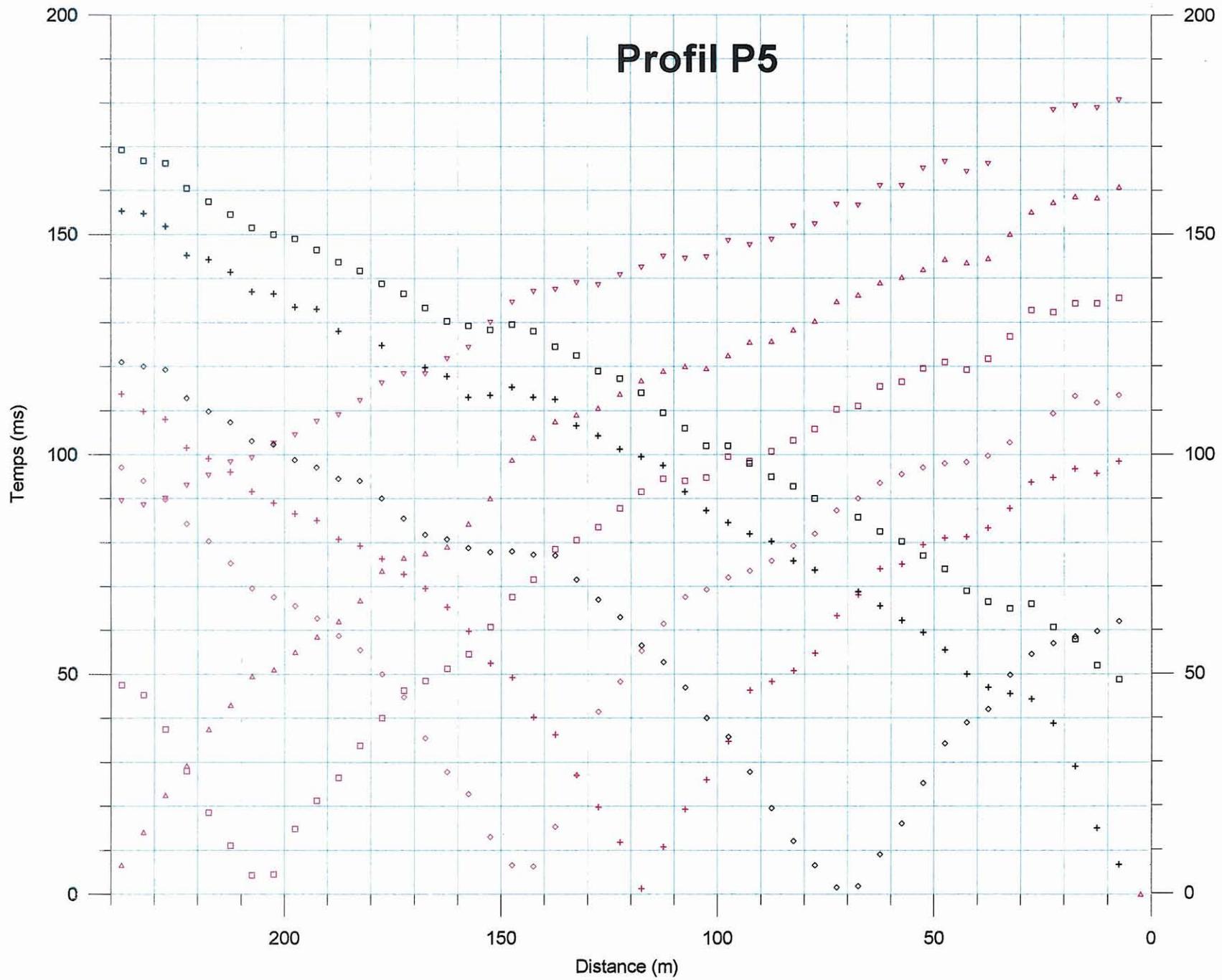
Courbes temps-distance (dromochroniques) des arrivées premières de sismique réfraction











BRGM
SERVICE AMÉNAGEMENT ET RISQUES NATURELS
Unité Auscultation, reconnaissance, surveillance
BP 6009 – 45060 Orléans cedex 2 - France - Tél. : 33 (0)2 38 64 34 34