

DOCUMENT PUBLIC

*Test du radar géologique
dans la baie du Mont Saint Michel
au Gué de l'Epine et à Saint Pair-sur-Mer
(Manche)*

juillet 1996
R 39005



DOCUMENT PUBLIC

*Test du radar géologique
dans la baie du Mont Saint Michel
au Gué de l'Epine et à Saint Pair-sur-Mer
(Manche)*

J.C. Gourry
avec la collaboration de
F. Le Jeune

juillet 1996
R 39005



Mots clés : Géoradar, sédimentation, Mont Saint-Michel, Manche

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

Gourry J.C., Le Jeune A. (1996)- Test du radar géologique dans la Baie du Mont-Saint-Michel au Gué de l'Épine et à Saint-Pair-sur-Mer (Manche) - Rap. BRGM R 39005; 29 p., 11 fig., 2 tabl..

© BRGM, 1996, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM

Synthèse

Dans le cadre du projet BRGM P03 "Processus et transferts en milieu littoral", un test des capacités du radar géologique en domaine côtier a été réalisé dans la baie du Mont Saint Michel (Manche) afin de cartographier les figures sédimentaires. Un premier profil a été mené dans la tange au Gué de l'Épine (Sud Ouest d'Avrancher), un deuxième sur une dune à Saint Pair sur Mer (sud de Granville).

En raison de la forte conductivité de la tange (0.2 à 0.3 S/m) due à la salinité importante du terrain, aucun signal cohérent n'a pu être enregistré au Gué de l'Épine.

En revanche 4 interfaces comprises entre 0 et 3 m environ sont recensées sous la dune de Saint Pair sur Mer. Le bedrock (grès) partiellement fracturé est visible sous le sable dunaire. Le biseau salé a pu être identifié. Une zone plus conductrice en forme de tranchée a été interprétée comme un paléo-chenal faisant remonter la salinité.

Le radar est donc un outil géophysique permettant de recenser des figures sédimentaires complexes en bord de côte. Il permet également de mesurer le niveau du biseau salé. Mais la proximité de la mer joue en défaveur du radar car il est impossible de mesurer dans un encaissant très conducteur, en particulier s'il est salé.

Sommaire

Synthèse	3
Liste des figures et tableaux.....	6
1. Introduction.....	7
2. Compte rendu des mesures.....	9
2.1. Hommes et moyens	9
2.2. Le Gué de l'Epine (Baie du Mont-Saint-Michel)	9
2.3. La dune de Saint Pair-sur-Mer	11
3. Traitement des données radar	15
3.1. Analyses de vitesse Nmo.....	15
3.2. Traitement des profils radar	15
3.3. Mesure des résistivités	15
4. Résultats	17
4.1. Le Gué de l'Epine (Baie du Mont-Saint-Michel)	17
4.1.1. Résistivité des terrains superficiels	17
4.1.2. Profils radar	17
4.2. La dune de Saint-Pair-sur-Mer	17
4.2.1. Résistivité des terrains superficiels	17
4.2.2. Profils radar	17
4.2.3. Interprétation succincte du profil à 500 MHz	21
5. Conclusion	27
6. Bibliographie	29

Liste des figures

- Figure 1 : Situation géographique de la zone de mesure au Gué de l'Epine. Position des profils radar.
- Figure 2 : Photo du bord du chenal le long a) du profil P1, b) du profil P2.
- Figure 3 : Situation géographique des mesures radar réalisées à Saint Pair sur Mer (Manche)
- Figure 4 : Profil de résistivité vertical obtenu sur la carotte du Gué de l'Epine
- Figure 5 : Profil de résistivité vertical obtenu sur la carotte de Saint Pair sur Mer
- Figure 6 : Profil radar brut enregistré à 500 MHz au Gué de l'Epine.
- Figure 7 : Radargramme du profil enregistré à 100 MHz (bistatique) à Saint Pair sur Mer. Radargramme avant migration : gain adapté, filtrage f-k, corrections statiques.
- Figure 8 : Profil radar brut enregistré à 500 MHz à Saint Pair sur Mer. Après filtrages et corrections statiques.
- Figure 9 : Profil radar migré enregistré à 500 MHz à Saint Pair sur Mer. Vitesse de migration : 13.3 cm/ns
- Figure 10 : Profil radar migré enregistré à 500 MHz à Saint Pair sur Mer. Vitesse de migration : 12.0 cm/ns
- Figure 11 : Interprétation schématique des profils radar réalisées sur la dune de Saint Pair sur Mer.

Liste des tableaux

- Tableau 1 : Mesures radar réalisées au Gué de l'Epine
- Tableau 2 : Mesures radar réalisées à Saint Pair sur Mer.

1. Introduction

Ce travail se situe dans le cadre du projet P03 du BRGM "Processus et transferts en milieu littoral". Le but de l'étude est la détection des figures de sédimentation en baie du Mont Saint Michel par techniques géophysiques.

Le terrain de mesure est situé sur le cordon littoral dans une zone trop humide pour faire de la sismique terrestre et où le niveau d'eau à marée haute est trop faible (voire inexistant) pour de la sismique marine.

L'une des techniques envisageables si l'on veut une bonne résolution est le radar géologique. Le but de cette opération est de voir les limites et capacités du radar dans cet environnement côtier.

Deux sites de mesures sont envisagés : la tangué (silts fins peu argileux) de la baie du Mont St Michel et les dunes de sable de Saint Pair sur Mer.

2. Compte rendu des mesures

2.1. HOMMES ET MOYENS

Une équipe de géophysiciens du BRGM constituée de Jean Christophe Gourry, du département DR/GIG, accompagné de François Le Jeune, du Département de Géophysique Appliquée, est allée réaliser des mesures à l'aide d'un radar géologique les 23 et 24 mai 1996.

Ils étaient assistés techniquement par Pierre Watremez (BRGM/DR/HYT), Christian Gorini et Bernadette Teissier (Université de Lille).

Le radar géologique utilisé est le SIR 10A de GSSI. Nous avons emporté les antennes 20-80 MHz (3200 MLF), 100 MHz (3207) et 500 MHz (3102). Une imprimante thermique noir et blanc de terrain nous a permis de contrôler la qualité des mesures au fur et mesure de leur acquisition. Tout cet équipement était porté sur une brouette auto-tractionnée sur chenillette, les antennes étant tirées par cette dernière.

Le repérage du profil est obtenu par l'enregistrement sur profil radar de marques espacées tous les 5 m.

2.2. LE GUE DE L'EPINE (BAIE DU MONT SAINT MICHEL)

Cette zone d'expérimentation est située entre la Sélune et la Sée (figure 1). Les terrains sont constitués de silts, limons sableux très fins et peu argileux, appelés la tangué (figure 2). Cette zone est régulièrement envahie par la mer pour les marées de fort coefficient. Au moment des mesures, la dernière marée haute couvrant la zone datait de 2 semaines. Le sol est herbu (prés salés).

Afin de calibrer le radar, nous avons réalisé un premier profil P1 le long d'un chenal naturel taillé dans les limons et présentant plusieurs niveaux différents de sédimentation. Un deuxième profil P2 est situé en bord des herbus le long de la Sélune, également en bord de la chenal. Le troisième et dernier profil part du niveau d'eau au bord de la Sélune (PM 34 du P2) et s'en éloigne vers le nord perpendiculairement. Ce profil coupe un niveau plus argileux au PM5. Plusieurs essais ont été menés avec les antennes 500 MHz et 100 MHz (tableau 1). Ces profils sont enregistrés sur la cassette Exabyte "Mont Saint Michel n°1".

Numéro du fichier sur la cassette	Nom du profil	Longueur (m)	Fréquence (MHz)
FILE1	P1	50	500
FILE9	P1	50	100 (bi-statique)
FILE4	P2	50	500
FILE7	P3	30	500

Tableau 1 : Mesures radar réalisées au Gué de l'Epine

Une carotte de sable de 85 cm de long a été constituée par fonçage d'un tuyau PVC dans le sol.

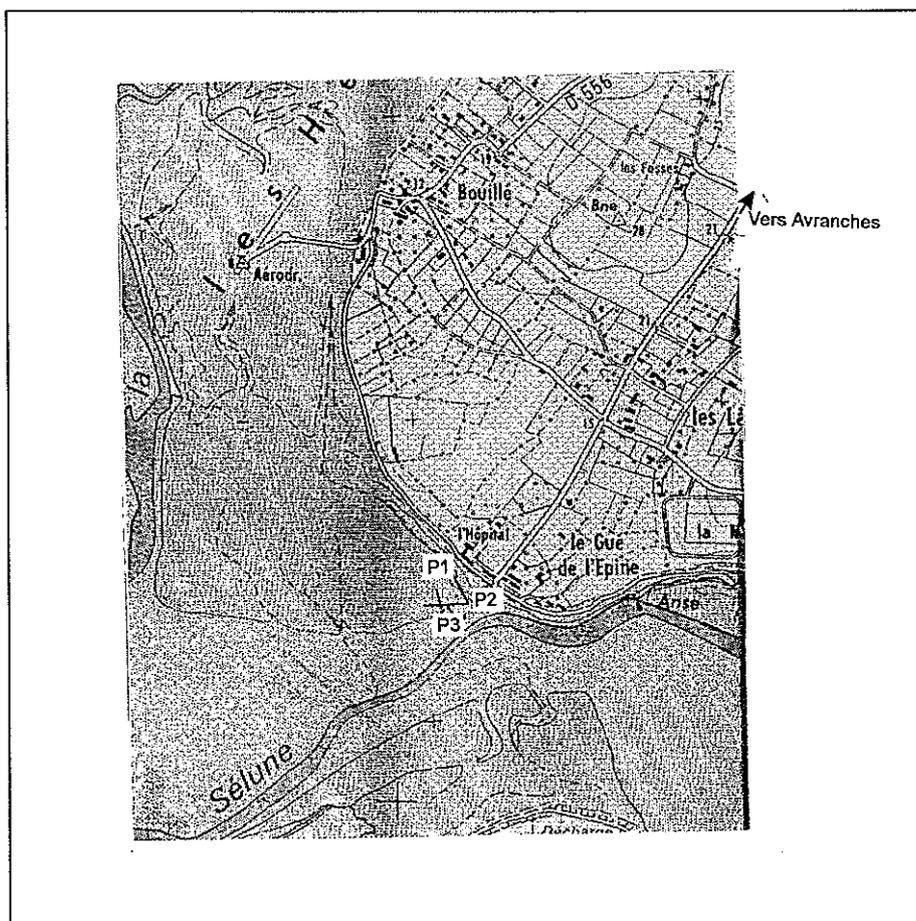


Figure 1 : Situation géographique de la zone de mesure au Gué de l'Épine.
Position des profils radar (échelle 1/25 000)

2.3. LES DUNES DE SAINT PAIR SUR MER

Un deuxième site de test a été choisi par Bernadette Tessier à Saint Pair sur Mer (Manche) au sud de Granville. La zone de mesure se situe sur la plage de Saint-Pair.

Le profil unique S1 de cette zone part du sommet d'une dune et descend vers la mer à l'ouest (figure 3, tableau 2). Sa longueur est de 50 m. Ce profil a été réalisé aux fréquences 100 et 500 MHz. A 100 MHz, nous avons réalisé 1 premier profil en mode bistatique (écartement de 2 m entre émetteur et récepteur) et en monostatique. Le haut de la dune est couverte de longues herbes épaisses. Deux barrières de piquets serrés destinées à tenir le sable de la dune se situent aux PM 3 et PM 6. Ceci nous a obligé à commencer le profil à 100 MHz au PM 6.

A 500 MHz, le profil a été arrêté et repris avant et après les barrières de piquets.

Un CMP a été enregistré au PM 10, perpendiculairement au profil S1, c'est-à-dire perpendiculairement à la pente, afin de ne pas avoir de correction de pendage à réaliser. Le pas de mesure du CMP est 0.5 m, l'écartement de départ est 1 m, l'écartement de fin est 15 m. Ces profils sont enregistrés sur la cassette Exabyte "Mont-Saint-Michel n° 2".

Numéro du fichier sur la cassette	Nom du profil	Longueur (m)	Fréquence (MHz)
FILE8	S1	50	500
FILE13	S1	50	100 (bi-statique)
FILE15	S1	50	100 (monostatique)
FILE16	CMP1	15	100

Tableau 2 : Mesures radar réalisées à Saint Pair sur Mer

Une carotte de sable de 43 cm de long a été constituée par fonçage d'un tuyau PVC dans le sol.

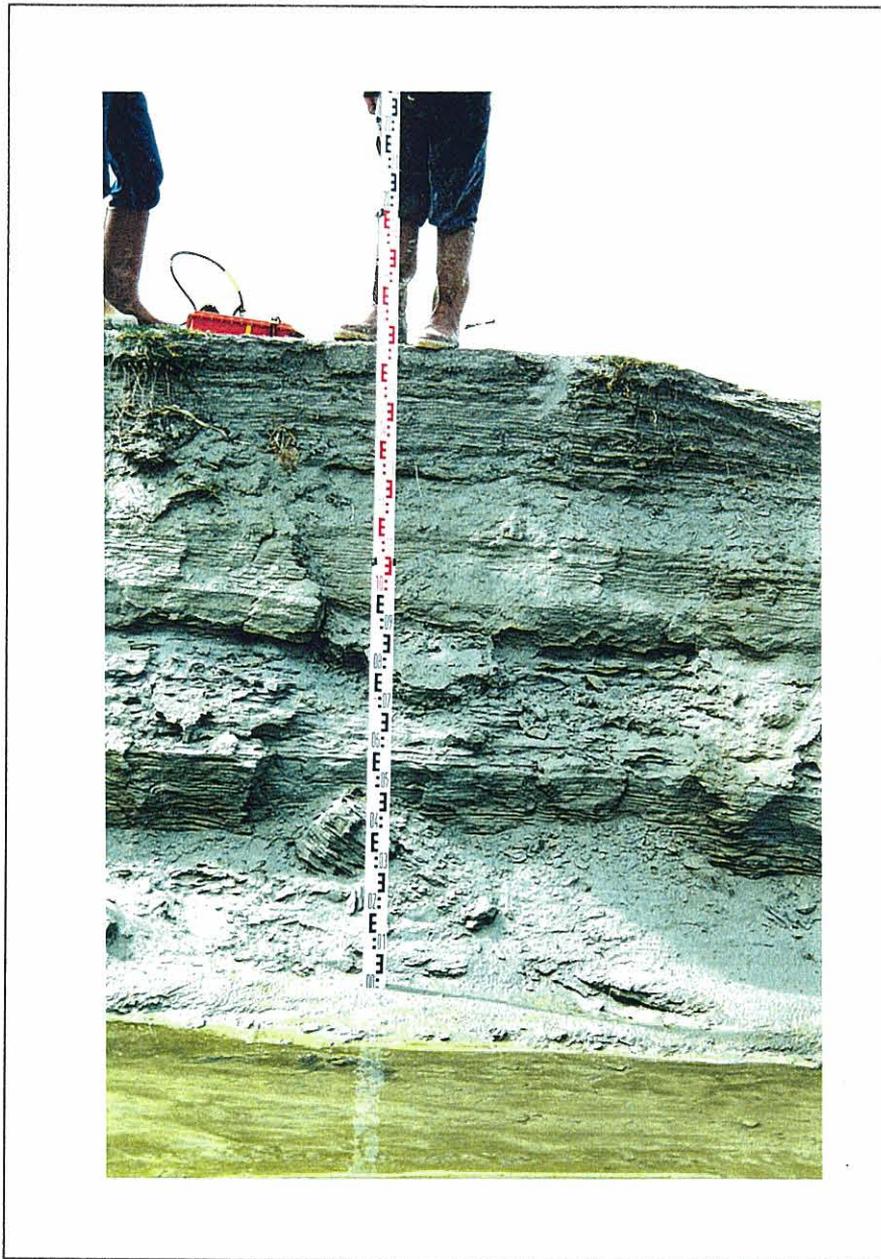


Figure 2 : Photo du bord du chenal le long du profil P1

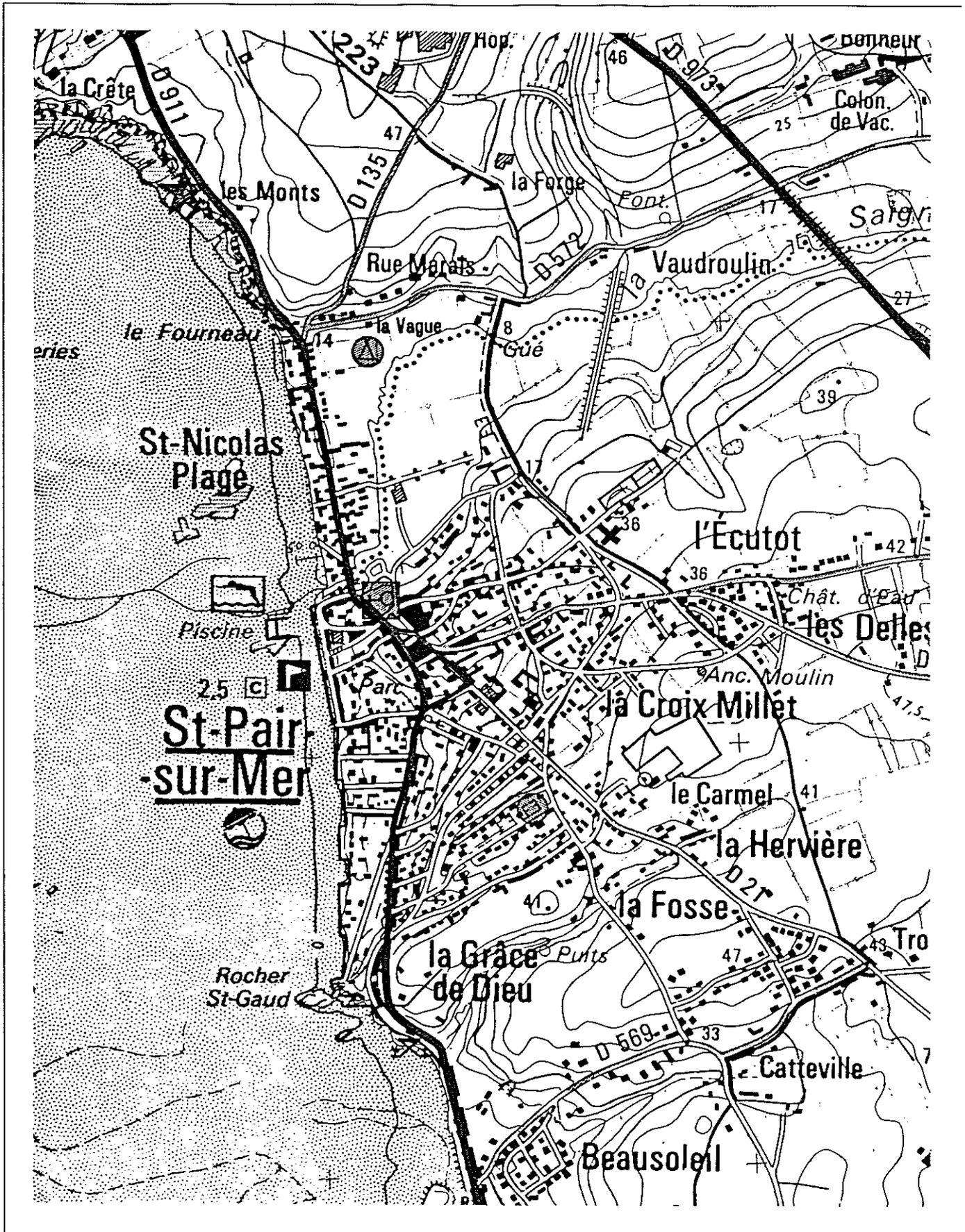


Figure 3 : Situation géographique des mesures radar réalisées à Saint-pair-sur-Mer (Manche)(échelle : 1/12 500)

3. Traitement des données radar et mesure des résistivités des terrains

Les données radar ont été compilées (transfert sur PC et contrôle de qualité) à l'aide du logiciel RADAN III de GSSI, puis transférées sur station de travail DEC pour un traitement à l'aide du logiciel SU (Seismic Unix) de la Colorado School of Mines (USA).

3.1. ANALYSES DE VITESSE NMO

Le CMP enregistré à Saint Pair a été analysé par NMO (Normal Move Out) décrit par Yilmaz (1987). Chaque horizon géophysique apparaît comme une hyperbole sur un CMP. Par NMO, on applique une série de corrections de vitesse à ce CMP. Une vitesse correspond à celle des terrains situés au-dessus quand un horizon est redressé. Cette vitesse est la vitesse quadratique pondérée des terrains situés au-dessus.

Afin de repérer une onde aérienne, on applique une vitesse de 30 cm/ns (vitesse de la lumière dans l'air). Les horizons redressés pour cette vitesse correspondent à des arrivées dans l'air.

3.2. TRAITEMENT DES PROFILS RADAR

Compte tenu des environnements géologiques simples, le traitement appliqué est très classique (Grandjean, 1995) :

- réchantillonnage spatial afin d'avoir le même nombre de trace par unité de longueur,
- suppression des gains appliqués sur le terrain,
- compensation du signal par application d'un gain adapté moyen,
- correction statique avec une vitesse moyenne obtenue par analyse des CMP,
- filtrage passe-bande : 50 % et 150 % de la fréquence centrale des antennes,
- migration avec la vitesse moyenne obtenue par analyse des CMP,

3.3. MESURE DES RESISTIVITES

Les résistivités des carottes ont été obtenues par mesure, à tension constante V , l'intensité de courant I circulant dans un cylindre fermé par deux électrodes de cuivre insérées dans la carotte. De cette mesure de résistance R , on en déduit la résistivité P de cet échantillon de carotte :

$$R = \frac{V}{I} \qquad P = R \cdot \frac{S}{l}$$

où S et l sont respectivement la section et la longueur du cylindre. La répétitivité des mesures donne une erreur de 1% environ.

4. Résultats

4.1. LE GUE DE L'EPINE (BAIE DU MONT SAINT MICHEL)

4.1.1. Résistivité des terrains superficiels

L'analyse des résistivités de la carotte est représentée sur la figure 4. Les résistivités, entre 3 et 7 Ω .m, sont très basses en raison d'une concentration relativement importante d'eau de mer.

4.1.2. Profils radar

Aucun signal cohérent n'a pu être enregistré. Une plaque métallique de 0.5 m² a également été enterrée à 25 cm de profondeur. Aucune réflexion n'est visible (figure 6).

Ceci est dû aux très faibles résistivités du terrain qui l'ont transformé en véritable miroir électromagnétique.

4.2. LA DUNE DE SAINT PAIR SUR MER

4.2.1. Résistivité des terrains superficiels

L'analyse des résistivités de la carotte est représentée sur la figure 5. Les résistivités sont étalées entre 657 et 75 Ω .m, qui sont des résistivités permettant une bonne pénétration des ondes radar.

4.2.2. Profils radar

L'analyse NMO du CMP donne une vitesse moyenne de 13.3 cm/ns pour le réflecteur à 41.3 ns, soit à une profondeur de 2.75 m. Aucun autre réflecteur ne permet de connaître les vitesses des terrains sous-jacents. Par ailleurs ce CMP, réalisé à 100 MHz, laisse apparaître plusieurs ondes aériennes à 96 ns, 221 ns et 255 ns.

Le profil réalisé à 100 MHz en monostatique est beaucoup plus bruité dans cet environnement que le profil réalisé en bistatique. Le traitement du profil 100 MHz bistatique (figure 7) ne permet de recenser aucun horizon. On peut expliquer cela par la trop grande finesse des détails des couches (une dizaine de cm) pour être détectée avec une longueur d'onde de l'ordre d'un mètre.

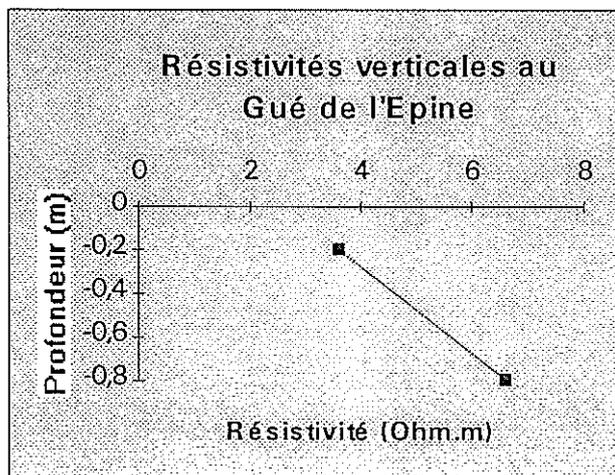


Figure 4 : Profil de résistivité verticale obtenu sur la carotte du Gué de l'Epine

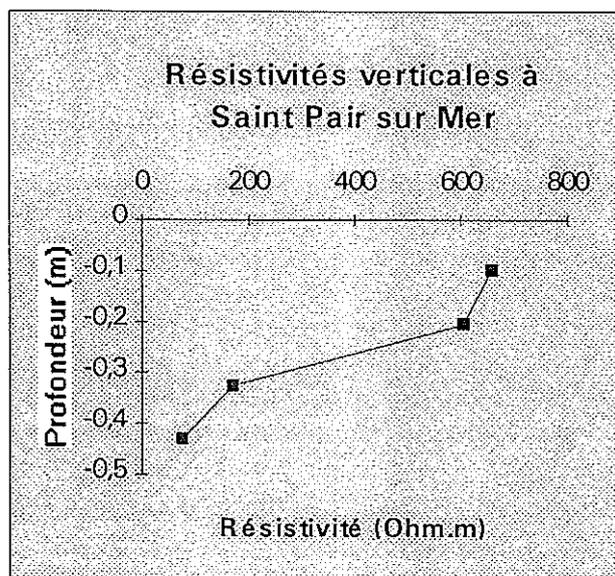


Figure 5 : Profil de résistivité verticale obtenu sur la carotte de Saint Pair sur Mer

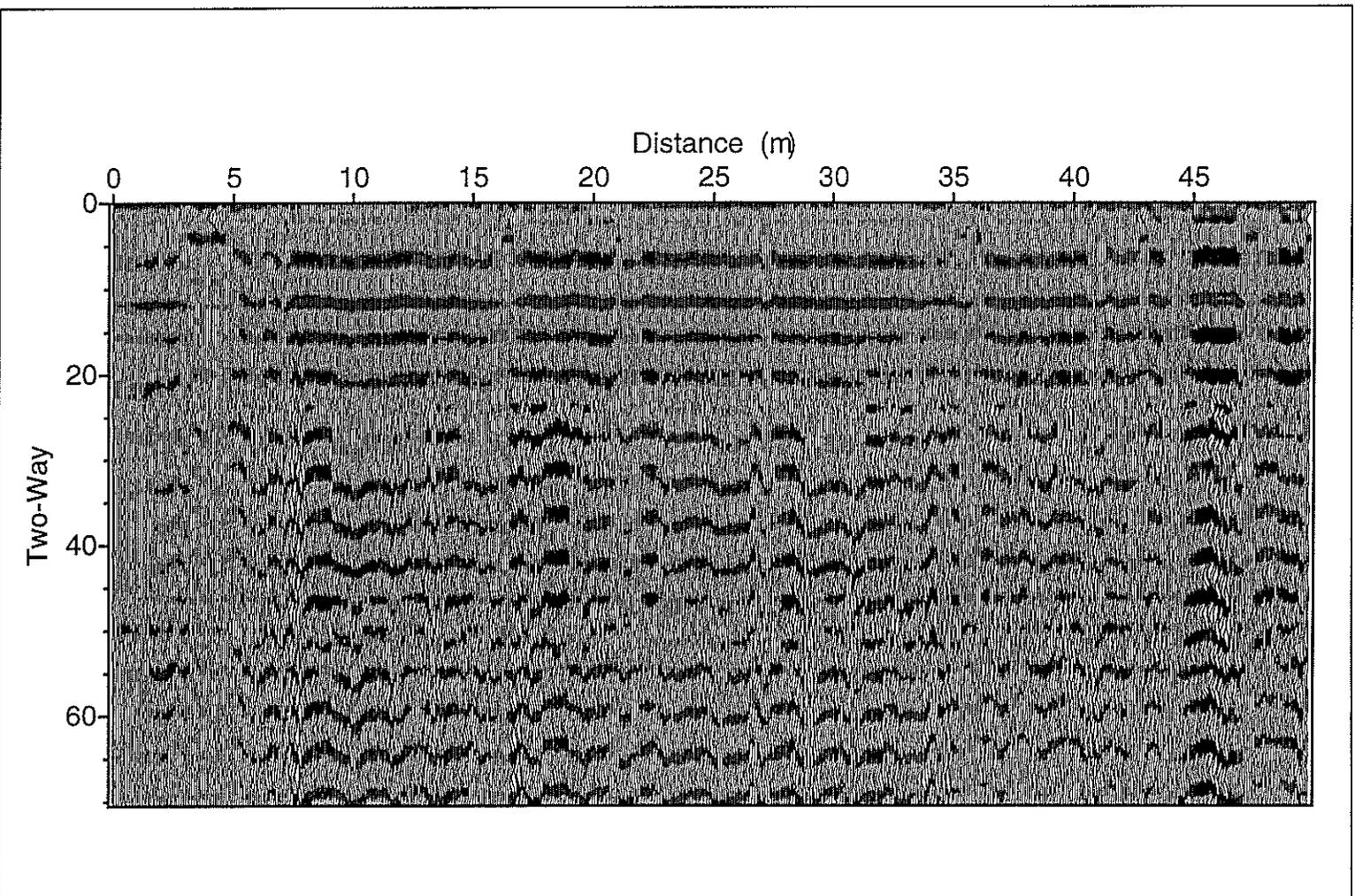


Figure 6 : Profil radar brut enregistré à 500 MHz au Gué de l'Épine

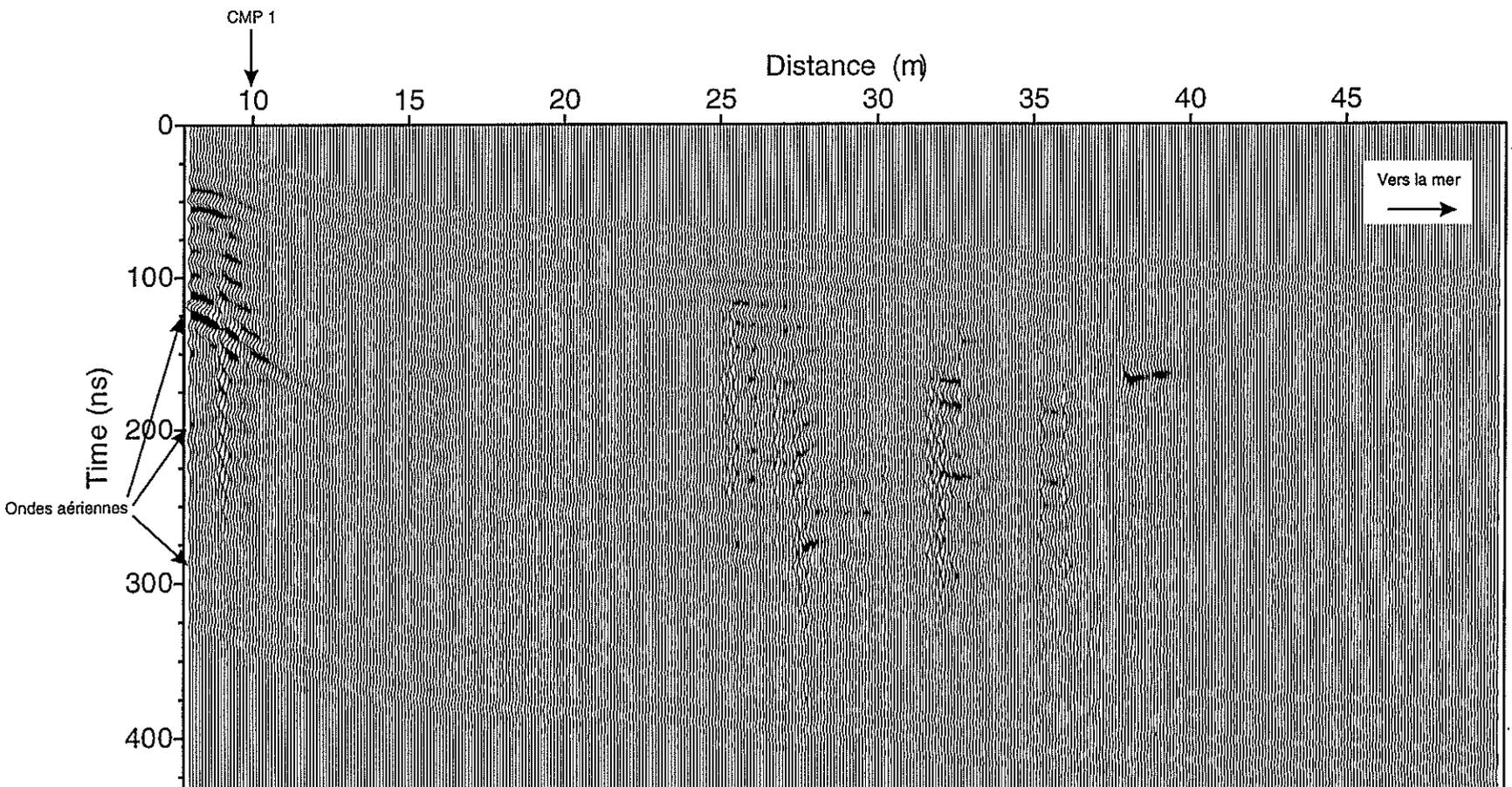


Figure 7 : Radargramme du profil enregistré à 100 MHz (bistatique) à Saint Pair sur Mer.
Radargramme avant migration : gain adapté, filtrage f-k, corrections statiques

Le profil réalisé à 500 MHz sera toujours représenté entre le PM 0 et 30, c'est-à-dire jusqu'au point où l'absorption du signal est complète à cause de la salinité (et donc de la forte conductivité) du terrain. Le profil brut montre de nombreux détails d'horizons entre 0 et 50 ns (figure 8). 2 migrations ont été réalisées pour une vitesse constante de 13.3 cm/ns (figure 9) et 12 cm/ns (figure 10). Dans les 2 cas, quelques "sourires" (hyperboles avec asymptotes tournées vers le haut dues à une vitesse de migration trop élevée) peu énergétiques sont visibles, mais avec une densité non constante. Ceci nous indique que le calage en vitesse n'est pas correct tout au long du profil, et que les vitesses varient beaucoup le long du profil. De plus comme l'humidité croît vite avec la profondeur dans un tel contexte, la vitesse radar doit chuter. Comme l'intensité des "sourires" est moins importante en profondeur pour une vitesse de 12 cm/ns, on peut donc supposer que la vitesse moyenne quadratique sur les 9 premières nanosecondes est approximativement de 13.3 cm/ns, celle des couches inférieures proche de 12 cm/ns. En première approximation, on peut donc considérer la vitesse radar moyenne égale à 12 cm/ns avec une erreur de 10 %.

Plusieurs faits marquants se distinguent sur ce profil (figure 8) :

- 4 interfaces sub-horizontales sous la dune entre les PM 0 et 22. La première interface s'arrête au PM 16, la deuxième au PM 13, la troisième et la quatrième sont visibles jusqu'à l'absorption totale du signal.
- on remarque de nombreuses hyperboles de diffraction sous la quatrième interface entre les PM 7 et 11 d'une part et entre les PM 21 et 24 d'autre part,
- le bruit dû à une absence complète d'écho est visible sous l'interface 4 entre les PM 11 et 50,
- une absorption totale du signal entre les PM 12 et 17 pour la quatrième interface. Les limites de perte de signal sont soulignées par 2 hyperboles de part et d'autre de cette zone.

4.2.3. Interprétation succincte du profil à 500 MHz

Toutes ces observations géophysiques nous conduisent à une hypothèse d'interprétation géologique de ce profil radar (figure 11).

Les 3 premières interfaces géophysiques correspondent aux toits de couche de sable de granulométrie différente et/ou présentant un contraste d'humidité net entre elles. Les deux premières couches doivent être composées de sables éoliens qui ont formé la dune.

La quatrième interface correspond au toit du bedrock (le grès de la falaise que l'on découvre au nord de la plage) car les hyperboles de diffraction semblent être des diffractions sur des fractures sub-verticales dans le grès (entre les PM 7 et 11) ou à des blocs de grès posés sur le bedrock (entre les PM 21 et 24). Le bedrock se trouve à la cote 5.5 m environ. On distingue une fracture affleurant sous le sable vers le PM 3.

L'absorption totale du signal radar est un témoin d'une forte conductivité du terrain. Or, une conductivité importante (figures 4 et 5) en domaine côtier, dans des terrains sub-saturés, ne peut être la conséquence que d'une salinité importante du matériau.

La zone d'absorption entre les PM 12 et 17 correspondrait à un paléo-chenal comblé par des sables de granulométrie différente et où le niveau salé est plus élevé. On a pu recenser deux limites de ce paléo-chenal. Cette hypothèse de paléo-chenal est renforcée par l'existence d'un léger changement de pente en surface au droit de cette zone qui serait dû à une sédimentologie différente.

La profondeur du biseau salé chute brutalement au PM 11.

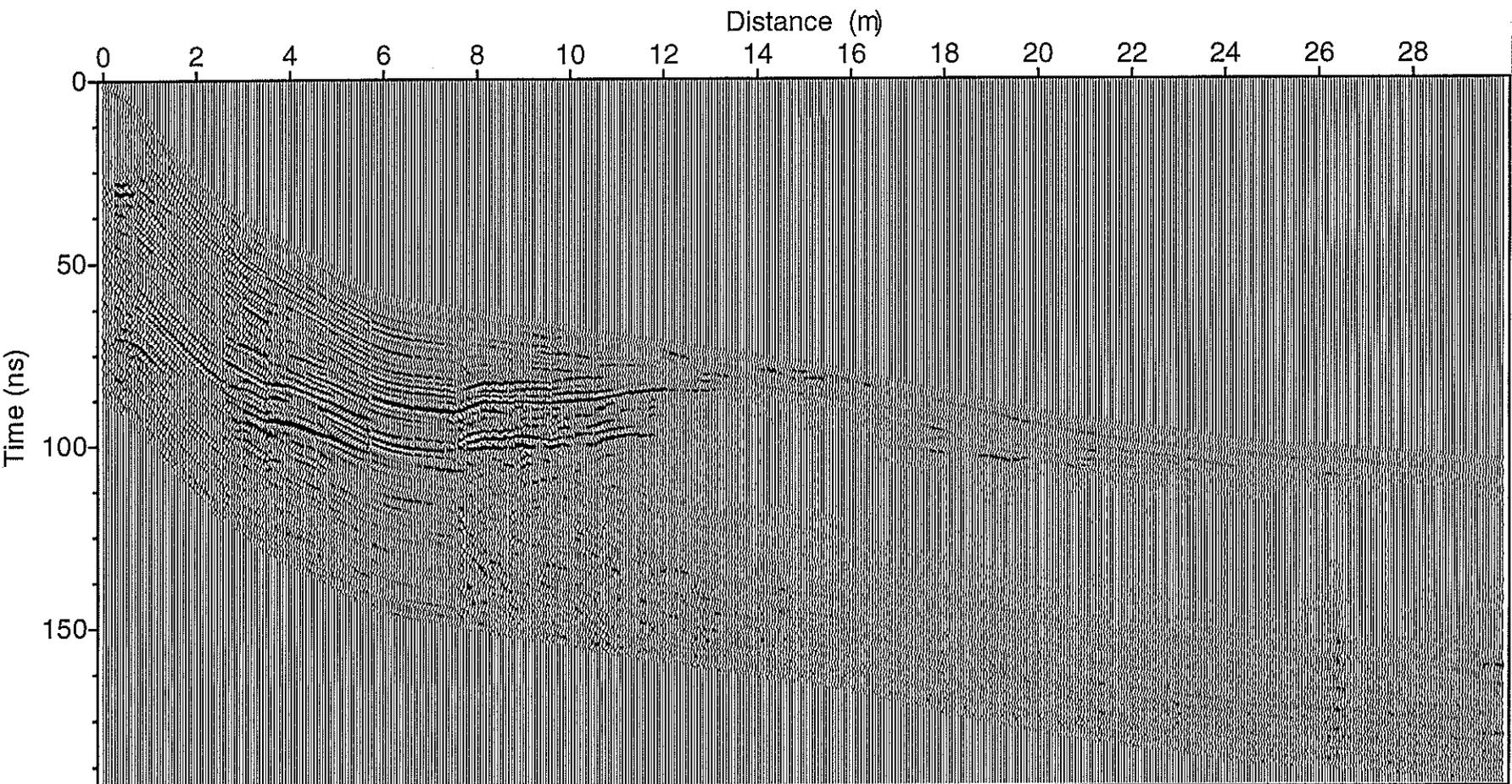


Figure 8 : Profil radar brut enregistré à 500 MHz à Saint Pair sur Mer.
Après filtrages et corrections statiques

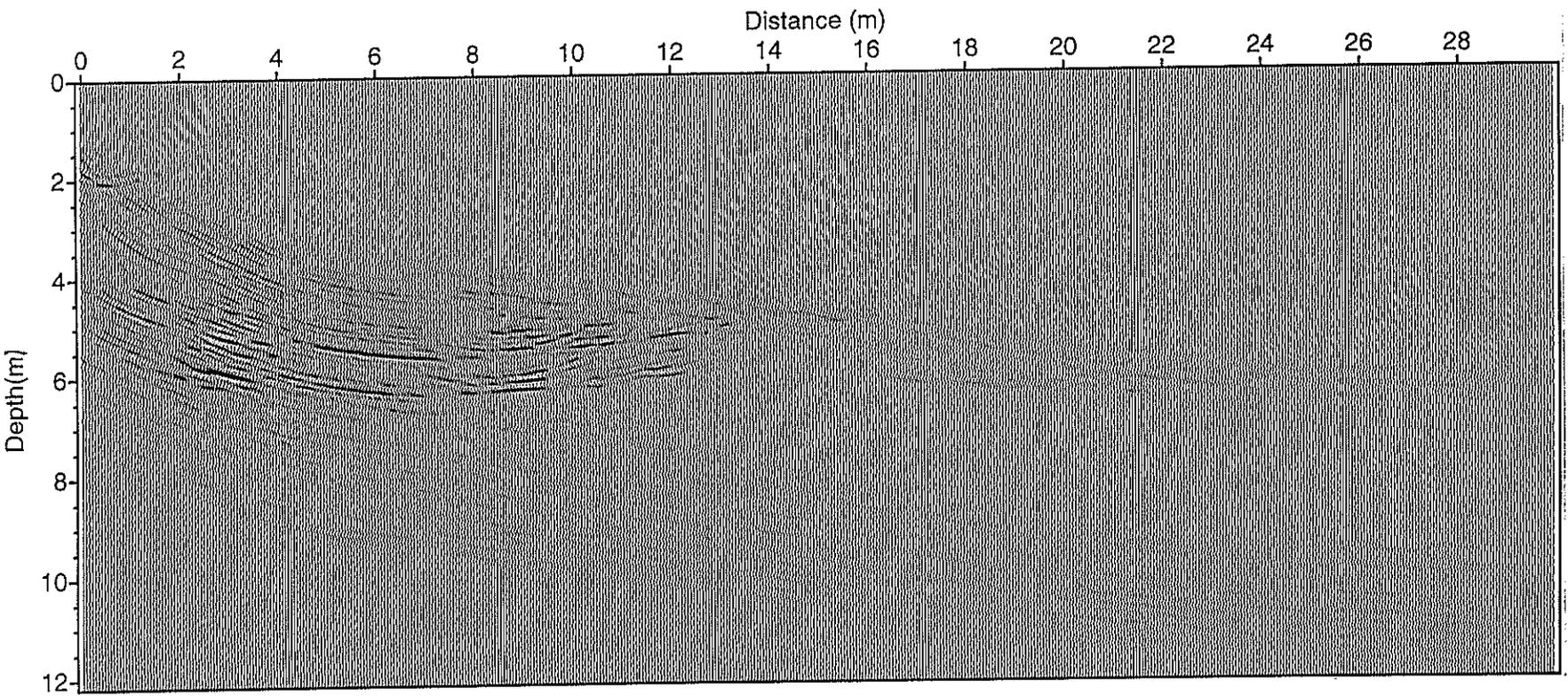


Figure 9 : Profil radar migré enregistré à 500 MHz à Saint Pair sur Mer.
Vitesse de migration : 13.3 cm/ns

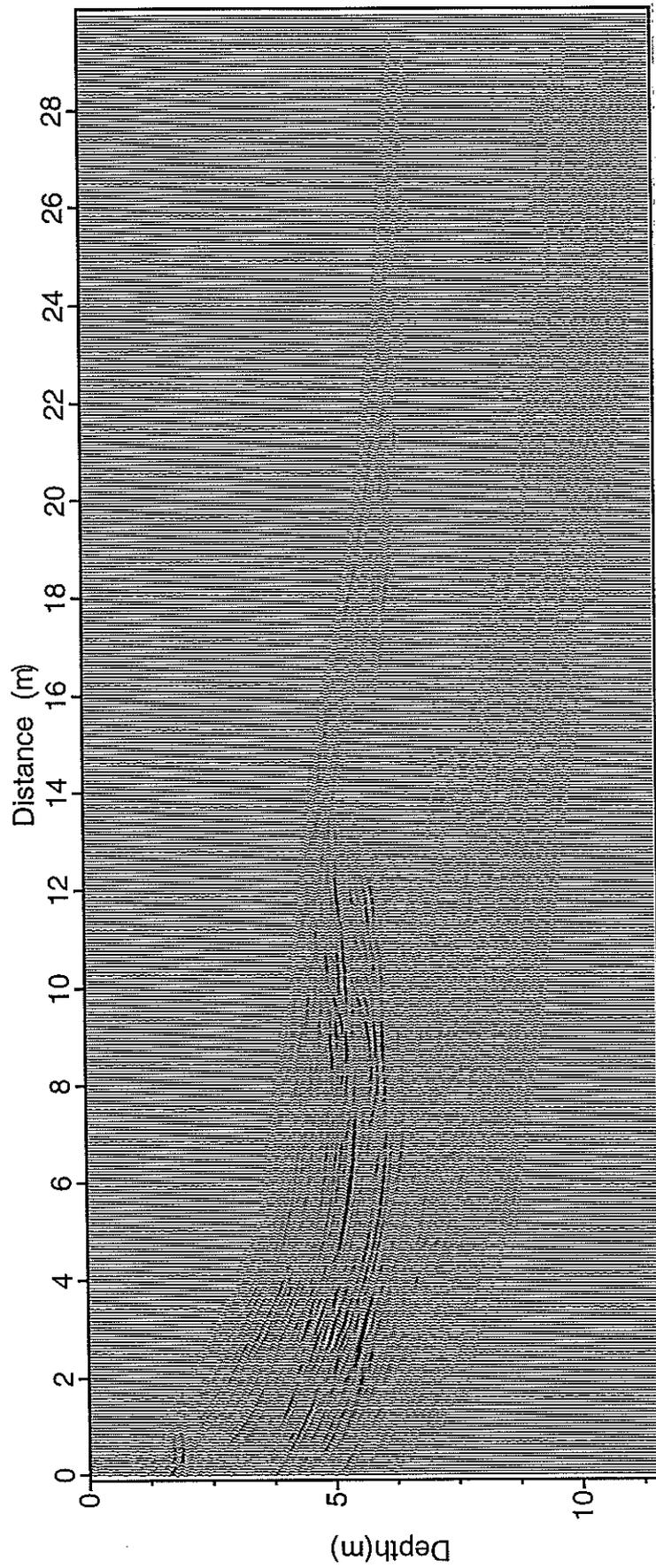


Figure 10 : Profil radar migré enregistré à 500 MHz à Saint Pair sur Mer.
Vitesse de migration : 12.0 cm/ns

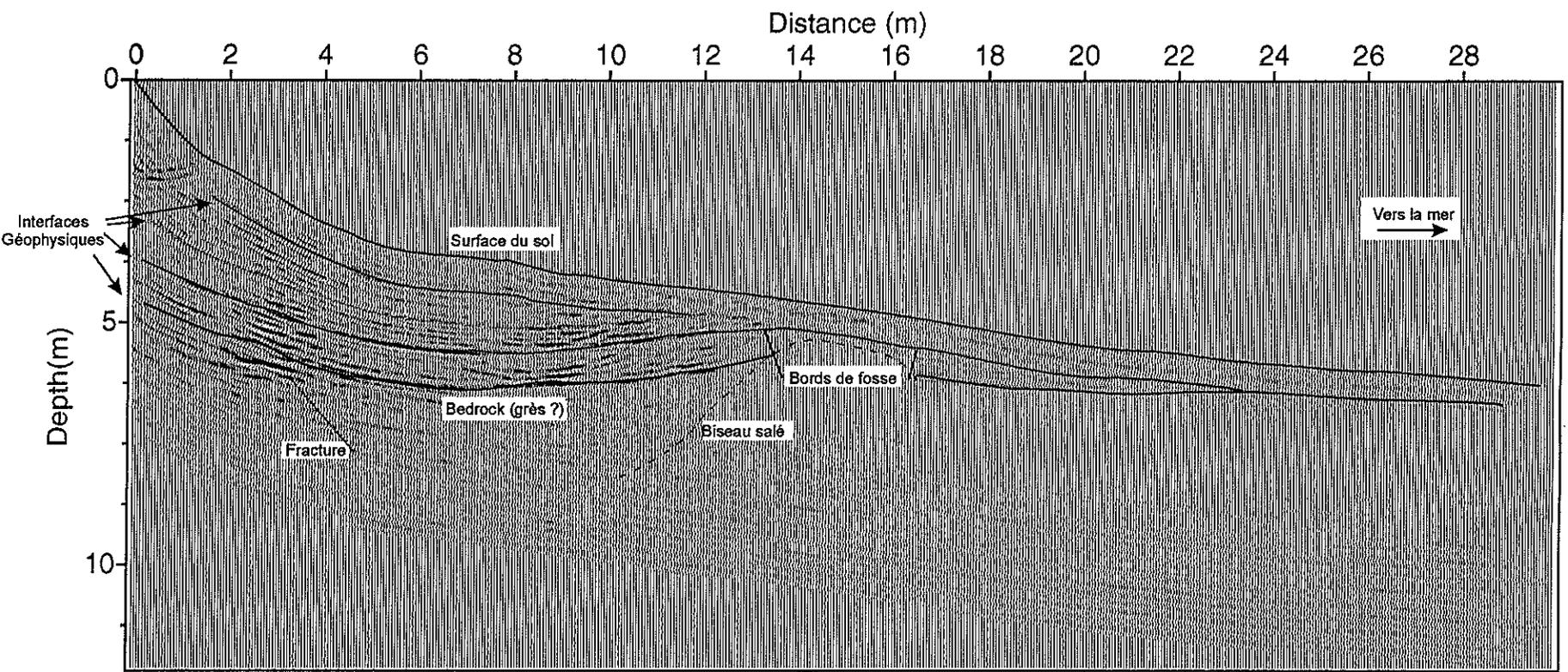


Figure 11 : Interprétation schématique des profils radar réalisés sur la dune de Saint Pair sur Mer

§5

5. Conclusion

Les conditions de terrain étant très différentes entre la tange de la baie du Mont St Michel et les dunes de sable de Saint Pair, les résultats sont à l'opposé.

En raison de la forte conductivité de la tange (0.2 à 0.3 S/m) due à la salinité importante du terrain, aucun signal cohérent n'a pu être enregistré au Gué de l'Épine.

En revanche 4 interfaces comprises entre 0 et 3 m environ sont recensées sous la dune de Saint Pair sur Mer. Le bedrock (grès) partiellement fracturé est visible sous le sable dunaire. Le biseau salé a pu être identifié. Une zone plus conductrice a été interprétée comme un paléo-chenal faisant remonter la salinité.

Le radar est donc un outil géophysique permettant de recenser des figures sédimentaires complexes en bord de côte. Il permet également de mesurer le niveau du biseau salé. Mais la proximité de la mer joue en défaveur du radar car il est impossible de mesurer dans un encaissant très conducteur, en particulier s'il est salé.

6. Bibliographie

Grandjean G., 1995. Application des procédures de traitement sismique aux données de géoradar. Rapport BRGM R 38574.

Yilmaz O., 1987. Seismic data processing. Soc. Expl. Geophys.

BRGM
DIRECTION DE LA RECHERCHE
Département Géophysique et Imagerie Géologique
BP 6009 - 45060 ORLEANS Cedex 2 - France - Tél. (33) 38 64 34 34