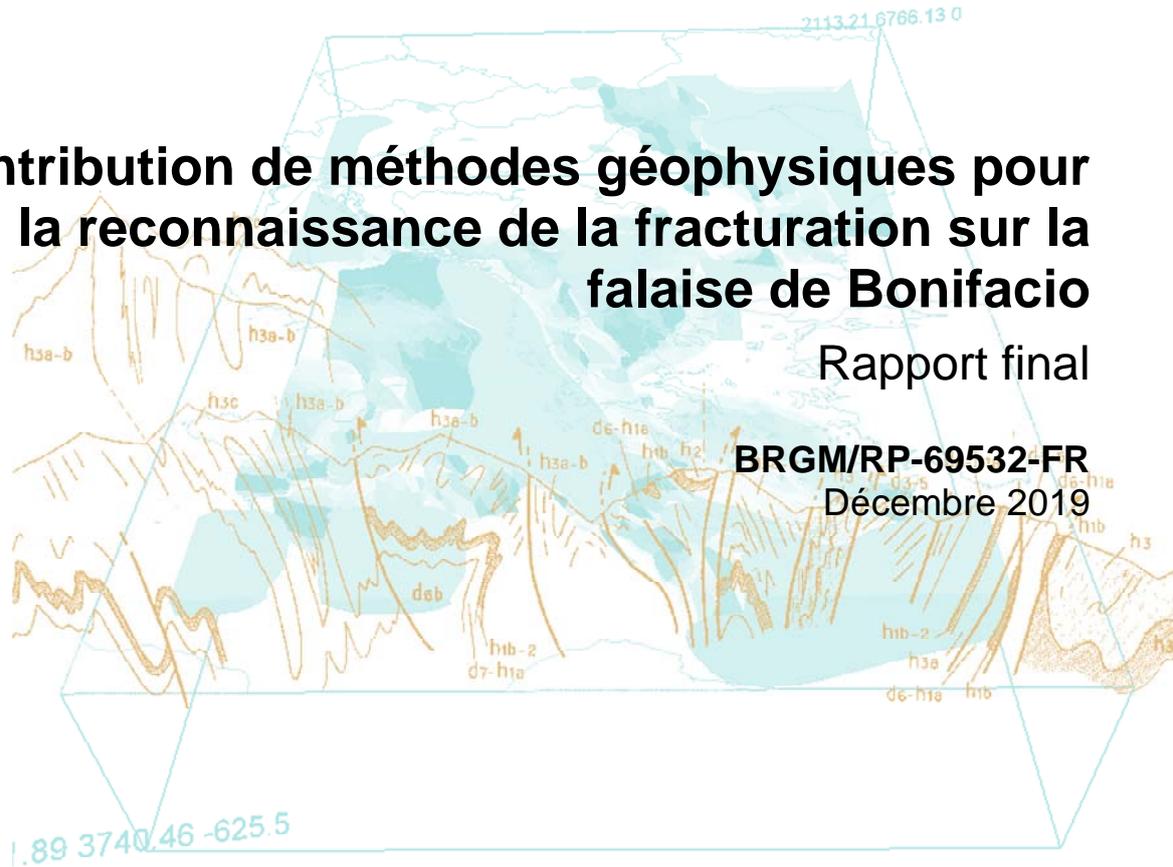


Contribution de méthodes géophysiques pour la reconnaissance de la fracturation sur la falaise de Bonifacio

Rapport final

BRGM/RP-69532-FR
Décembre 2019



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Contribution de méthodes géophysiques pour la reconnaissance de la fracturation sur la falaise de Bonifacio

Rapport final

BRGM/RP-69532-FR
Décembre 2019

J. Deparis

Vérificateur :

Nom A. BITRI
Fonction : Géophysicien
Date : 25/03/2020
Signature :

Approbateur :

Nom : A. REY
Fonction : Directeur régional BRGM
Corse
Date : 06/04/2020
Signature :



Le système de management de la qualité et de l'environnement
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.
Contact : qualite@brgm.fr

Mots-clés : Aléa, Radar, Falaise

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

Deparis J. (2019) – Contribution de méthodes géophysiques pour la reconnaissance de la fracturation sur la falaise de Bonifacio. Rapport final. BRGM/RP-69532-FR, 50 p., 16 ill., 2 ann..

© BRGM, 2019, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

D'après la cartographie des aléas mouvements de terrain établie par le CEREMA en 2013 et 2014, le secteur de la Citadelle de Bonifacio est concerné par deux types de phénomènes pouvant affecter la falaise sur laquelle la ville haute est établie : la « chute de petits blocs » (<1 m³), et « l'éboulement en grande masse ». Ce dernier aléa est problématique puisque qualifié de fort à très fort dans le secteur de la citadelle où la falaise forme un surplomb avec un dévers maximum d'environ 20 m et présentant des enjeux patrimoniaux importants (habitats, place, etc).

L'étude détaillée de la stabilité du pilier de la Citadelle de Bonifacio, engagée depuis 2018 par les services de l'Etat et confiée aux opérateurs BRGM, INERIS et CEREMA, doit permettre notamment d'évaluer le volume rocheux mobilisable et de préciser sa stabilité à court comme à long terme. Dans ce cadre, plusieurs types d'investigations et suivis ont été menés afin de préciser le modèle géologique, géométrique et géomécanique du compartiment étudié et de comprendre les mécanismes influant sur sa stabilité.

Durant la période des investigations (dix-huit mois), l'étude doit notamment permettre, de détecter – ou non - d'éventuels mouvements pouvant être rapportés à une évolution topographique dudit volume rocheux et les distinguer d'autres mouvements naturels (effets de la température, notamment) ou liés à l'activité anthropique. Les résultats obtenus sur la période feront partie des éléments techniques d'appréciation de la prédisposition au mouvement de la masse rocheuse potentiellement instable de la Citadelle.

Dans le cadre de cette étude, le BRGM a réalisé une opération géophysique en deux temps :

- Détection de la fracturation depuis la surface (depuis le haut de la falaise et en paroi) ;
- Détection de la fracturation depuis un forage recoupant les fractures principales.

Le but de la contribution géophysique était de détecter la fracturation en arrière de la paroi de falaise, et d'en établir la géométrie. La pénétration limitée des ondes électromagnétiques (EM), depuis le haut de la falaise et en paroi, dans les roches de Bonifacio (4 mètres) n'a pas permis d'apporter des éléments concrets à ce niveau.

La prospection géophysique de surface a toutefois permis de préciser la localisation de la partie sommitale d'une fracture orienté N100°aux abords de la place du marché.

Enfin, les diagraphies radars et optiques dans les forages F1, F2 et F3 ont permis de caractériser la fracturation et la stratification de la roche au niveau de la place du marché. En particulier la fracture principale N110° pouvant éventuellement découper le surplomb rocheux a été imagée par les deux méthodes.

Sommaire

1. Introduction	7
2. Géologie	9
2.1. LA FORMATION DE BONIFACIO (P1, P2, B1, B2, B3 ET B4).....	9
2.2. FRACTURATION.....	10
3. Mesures et moyens mis en œuvres sur le site de Bonifacio	13
3.1. RADAR GEOLOGIQUE	13
3.1.1.Principe du radar géologique.....	13
3.1.2.Système d’acquisition et personnel mobilisé.....	14
3.2. PROGRAMME DES REALISATIONS SUR SITE.....	16
4. Résultats	19
4.1. PROSPECTION RADAR DE SURFACE	19
4.1.1.Localisation des profils	19
4.1.2.Interprétation	20
4.2. PROSPECTION RADAR EN PAROI.....	23
4.2.1.Localisation des profils	23
4.2.2.Interprétation	24
4.3. DIAGRAPHIE EN FORAGE	25
4.3.1.Localisation des profils	25
4.3.2.Interprétation	27
5. Conclusions.....	33
6. Bibliographie	35

Liste des figures

ILLUSTRATION 1. FACIES DE LA FORMATION DE BONIFACIO	10
ILLUSTRATION 2. SCHEMA DE FRACTURATION DE LA REGION, DE BONIFACIO	11
ILLUSTRATION 3. SCHEMA DE PRINCIPE DE L'UTILISATION DU GPR (A) ET ONDES ASSOCIEES A UNE REFLEXION SUR UNE INTERFACE ET A UNE DIFFRACTION, AINSI QUE L'ONDE DIRECTE DANS L'AIR (B), D'APRES ANNAN (2001).	13
ILLUSTRATION 4. APPAREILLAGE RAMAC/GPR AVEC UNE ANTENNE BLINDEE DE 250MHZ (DANS LE CHARIOT) ET DE 500 MHZ.	15
ILLUSTRATION 5. APPAREILLAGE RAMAC/GPR AVEC DES ANTENNE NON BLINDEES DE 100MHZ SUR LA FALAISE .	16
ILLUSTRATION 6. PLAN D'IMPLANTATION DES PROFILS GEOPHYSIQUES DANS LES RUES DE BONIFACIO. LES PROFILS VERTICAUX SONT REPRESENTES PAR UN CERCLE MAUVE SITUE AU SOMMET DU PROFIL.	19
ILLUSTRATION 7. RESULTAT ET INTERPRETATION DU PROFIL RADAR R5.....	20
ILLUSTRATION 8. RESULTAT ET INTERPRETATION DES PROFILS RADARS R1 A R6	21
ILLUSTRATION 9. RESULTAT ET INTERPRETATION DES PROFILS RADARS R7 A R13.	22
ILLUSTRATION 10. LOCALISATION DES ANOMALIES (POINTS VERTS SUR LES PROFILS R5 – R7 ET R8) POUVANT MARQUE LE PASSAGE DE LA FAILLE (TRAIT DISCONTINU BLEUE).	23
ILLUSTRATION 11. LOCALISATION DES PROFILS P1 A P4 SUR LA FALAISE.	24
ILLUSTRATION 12. IMAGE RADAR DU PROFIL P4 (A) LE RADARGRAMME APRES TRAITEMENT POUR L'ANTENNE 100 MHZ SANS CORRECTION TOPOGRAPHIQUE, LA FIGURE B) MONTRE LE RADARGRAMME APRES TRAITEMENT ET AVEC CORRECTION TOPOGRAPHIQUE	25
ILLUSTRATION 13. LOCALISATION DES PROFILS RADAR SC1, SC2 ET SC3.....	26
ILLUSTRATION 14. DIAGRAPHIE RADAR ET OTIQUE REALISEE,DANS LE FORAGE F1A) LE RADARGRAMME APRES TRAITEMENT ET INTERPRETATION POUR L'ANTENNE 100 MHZ, LA FIGURE B) LE RESULTAT DU POINTE DES FRACTURES A PARTIR DE L'IMAGE OPTIQUE	27
ILLUSTRATION 15. DIAGRAPHIE RADAR ET OTIQUE REALISEE DANS LE FORAGE F2. A) LE RADARGRAMME APRES TRAITEMENT ET INTERPRETATION POUR L'ANTENNE 100 MHZ, B) RESULTAT DU POINTE DES FRACTURES A PARTIR DE L'IMAGE OPTIQUE	29
ILLUSTRATION 16. DIAGRAPHIE F3. LA FIGURE A) MONTRE LE RADARGRAMME APRES TRAITEMENT ET INTERPRETATION POUR L'ANTENNE 100 MHZ, LA FIGURE B) MONTRE LE RESULTAT DU POINTE DES FRACTURES A PARTIR DE L'IMAGE OPTIQUE	30

Liste des annexes

ANNEXE 1 METHODE RADAR.....	37
ANNEXE 2 PROFILS RADAR.....	42

1. Introduction

Les éboulements rocheux sont des phénomènes complexes, rapides et dévastateurs dont l'aléa reste difficile à appréhender. La stabilité d'un massif rocheux est guidée par la présence de discontinuités préexistantes (fractures, failles, diaclases, stratification) qui prédécoupent le massif en un agencement de blocs. C'est donc la géométrie (orientation, pendage) et les caractéristiques mécaniques (ouverture, remplissage) de ces discontinuités qui vont déterminer la stabilité d'un versant rocheux. Cependant, l'analyse des caractéristiques des discontinuités n'est possible qu'en surface, et de ce fait les informations relatives aux discontinuités internes ne sont pas accessibles. Seules des méthodes géophysiques non destructives peuvent fournir de telles informations, depuis la surface, sur la présence ou non des discontinuités en profondeur, et sur leurs caractéristiques 2D et 3D.

L'étude détaillée de la stabilité du pilier de la Citadelle de Bonifacio, engagée depuis 2018 par les services de l'Etat et confiée aux opérateurs BRGM, INERIS et CEREMA, doit permettre notamment d'évaluer le volume rocheux mobilisable et de préciser sa stabilité à court comme à long terme. Dans ce cadre, plusieurs types d'investigations et suivis ont été menés afin de préciser le modèle géologique, géométrique et géomécanique du compartiment étudié et de comprendre les mécanismes influant sur sa stabilité.

La Citadelle de Bonifacio repose sur une falaise qui est constituée de calcarénites (sable calcaire consolidé). Cette falaise, de 50 m de hauteur, présente un réseau de fractures complexes et perpendiculaires qui se recoupent. L'analyse de la fracturation montre que la roche est découpée par des dièdres pouvant générer des éboulements et présente donc un aléa fort (CEREMA, 2014). La partie sommitale de la falaise peut présenter des versants importants. Pour connaître la géométrie tridimensionnelle de ce compartiment rocheux (limites externes et fracturation interne), il est important de combiner 3 méthodes complémentaires :

- la prise détaillée d'observations géologique et structurale (sur le plateau, en paroi, dans les fissures ouvertes) ;
- la morphologie numérique à partir de mesures laser (lidar), permettant une description précise de la géométrie du compartiment et une localisation précise des mesures ;
- des reconnaissances géophysiques en surface et en paroi (tomographie électrique, radar géologique) pour localiser en surface et en profondeur les fractures principales et les caractériser (ouverture, remplissage, ponts de matière...)

Les deux premiers points sont des étapes nécessaires, et constituent des tâches préliminaires à l'étude géophysique. Au vu de ces éléments, et afin de mieux quantifier l'aléa, il apparaît important d'imager le réseau de fractures en profondeur à l'aide de méthodes géophysiques non invasives.

Dans le cadre de l'étude de la stabilité du pilier de la Citadelle de Bonifacio, et plus particulièrement dans le bloc 2A de l'étude (observations du site), le BRGM propose une opération géophysique en 2 temps :

- Détection de la fracturation depuis la surface (depuis le haut de falaise et en paroi)
- Détection de la fracturation depuis un forage recoupant les fractures principales.

Le but de la contribution géophysique est de détecter la fracturation en arrière de la paroi de falaise, et depuis le haut de falaise jusqu'à une profondeur d'au moins 20 mètres, d'en établir la

géométrie et d'estimer la présence éventuelle de pont rocheux (Frayssines, 2006) conditionnant la stabilité des roches (Deparis et al, 2007).

La méthode géophysique proposée

La méthode géophysique proposée est le radar géologique car il présente plusieurs avantages :

- C'est l'outil géophysique dont la résolution est la plus fine, et il est très sensible aux interfaces fins tels que des fractures (Deparis et al. 2009)
- C'est un outil léger qui peut être porté pour des mesures en falaise
- Compte tenu de la forte résistivité attendue dans les calcarénites, la profondeur d'investigation devrait atteindre 20 m environ avec des antennes 100 MHz pour une résolution de 25 cm environ.

Les méthodes électriques (tomographie de résistivité électrique, appelé également panneau électrique) ont été écartées parce que les mesures réalisées dans les rues seront entachées de fortes perturbations anthropiques : en effet, il y a des canalisations métalliques enterrées dans les rues à l'arrière de la falaise (par exemple dans la rue Doria). Par ailleurs, utilisée en front de falaise, sur une falaise de 50 m de hauteur maximum, cette méthode ne permettra pas d'atteindre une profondeur d'investigation supérieure à 10 m.

La méthode sismique a également été écartée pour imager la fracturation, car elle n'aura pas la résolution suffisante pour détecter des fractures peu ouvertes (quelques centimètres à quelques décimètres). De plus, le bruit sismique anthropique et la forte concentration du bâti dans ce secteur limitent considérablement l'application de cette technique.

2. Géologie

Ce passage a été repris du rapport de restitution du Bloc 3A (Malascrabes et al, 2019).

2.1. LA FORMATION DE BONIFACIO (P1, P2, B1, B2, B3 ET B4)

Les falaises sur lesquelles sont construites la citadelle de Bonifacio sont constituées de calcarénites et de sables fins plus ou moins consolidés d'âge Miocène, appelées formation de Bonifacio. S'y distinguent deux niveaux appelés membres, le membre de Pertusato (situé à la base) plus sableux et le membre de Bonifacio surmontant le précédent qui est constitué d'une alternance de grès et de calcarénites.

Le membre de « Pertusato », plutôt situé à la base, épais d'une trentaine de mètres, est constitué de sables fins, peu consolidés, correspondant à des dépôts de plage grandement influencé par l'action de la houle et des vagues de tempêtes (de 0 à +10m de profondeur). Très tendre, ce niveau est très sensible à l'érosion marine.

Le membre de « Bonifacio », qui surmonte le précédent, est composé d'une alternance de grès et de calcarénites, d'au moins cinquante mètres d'épaisseur. Ce type de roche témoigne d'un milieu de dépôt légèrement plus profond (0 à -10m) que la formation de Pertusato. Ce faciès, également tendre, est sensible aux érosions météoriques (vents, pluies) érodant particulièrement le niveau gréseux et mettant en surplomb les bancs plus calcaires. La base de ce membre est de plus en plus sableuse, se rapprochant en nature du membre de Pertusato.

Le Langhien marque le début de la formation de Bonifacio. Elle est discordante sur la formation de Cala di Labra et se subdivise en deux parties, le membre de Pertusato et le membre de Bonifacio (Figure 1-9).

Le membre de Pertusato surmonte par une discordance de ravinement la formation de Cala di Labra. Il comprend les unités P1 et P2. L'unité P1, d'une épaisseur pluri-décamétrique, est à la base une litharénite riche en graviers et en fragments de pectens puis au sommet une calcarenite sableuse riche en algues et coraux, similaire à l'unité C3. Cette unité présente également une fine couche argileuse de smectite ferrugineuse verdâtre à amphibole et cristobalite. L'unité P2 est organisée en litages obliques de pendage 4 – 7° SSW sur une dizaine de mètres puis en stratifications obliques opposées sur plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur. Elle est principalement composée de litharénite à grains épais à fins.

Le membre de Bonifacio, transgressif et discordant sur le membre de Pertusato et sur la formation de Cala di Labra, comprend les unités B1, B2, B3 et B4 sur une épaisseur maximale de 80 m. Seules les trois premières correspondent à un dépôt langhien. L'unité B1 est une litharénite calcaire peu cimentée à feldspaths quartziques. Elle présente peu d'éléments biologiques. L'unité B2 est une calcarenite à algues coralliennes encroûtantes, échinodermes et bryozoaires dont la fraction silicatée demeure proche de celle de l'unité B1. Enfin, l'unité B3 correspond à des calcarenites dominées par la présence d'algues coralliennes. La fraction silicatée y est inférieure à 10%.

L'unité B4 du membre de Bonifacio d'âge Serravalien, complète l'ensemble des dépôts sédimentaires du plateau de Bonifacio (Illustration 1 et Illustration 2). Cette unité est constituée par des rudites dominées par des algues coralliennes ainsi qu'une importante fraction de rhodolites. Dans les falaises, cette unité laisse apparaître quelques spéléothèmes pendants. Elle constitue l'actuelle surface d'érosion avec différentes vallées et, par endroits, des affleurements de roche altérée.

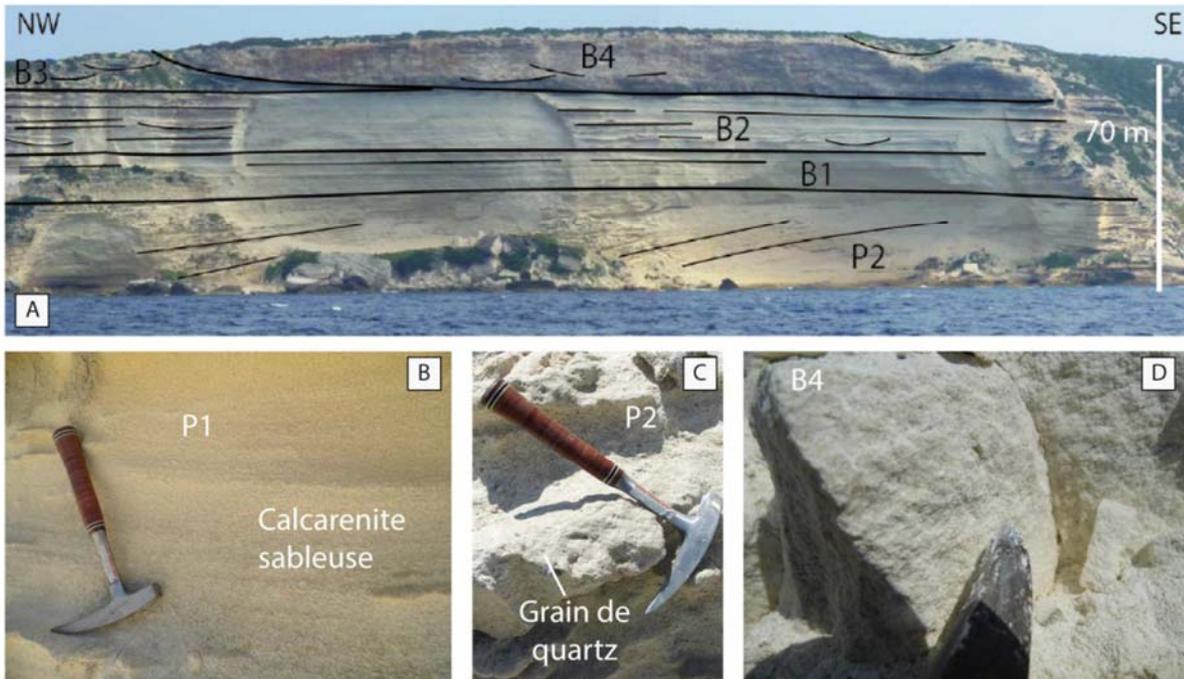


Illustration 1. Faciès de la formation de Bonifacio

La formation de Bonifacio marque donc une transition entre une sédimentation d'éléments silicatés et une sédimentation carbonatée, liée à une remontée du niveau de la mer au Langhien et à l'apparition de courants marins. D'une façon générale, la taille des grains des produits d'altération continentaux décroît de la base vers le sommet.

2.2. FRACTURATION

Depuis sa mise en place, la chaîne hercynienne a subi de nombreuses phases tectoniques et d'érosion, à travers notamment la surrection de la chaîne Pyrénéo-Provençale à l'Oligocène (-34 à -23 Ma).

A partir de l'Oligo-Aquitainien, (marquant aussi le début du remplissage sédimentaire du bassin de Bonifacio) débute l'Orogénèse alpine et l'ouverture de la mer Ligure qui sépare la Corse de l'Europe, suivie par l'ouverture de la mer Tyrrhénienne au Tortonien (-10 Ma). La Figure x montre l'orientation des linéaments sur l'ensemble de la région ainsi que les filons mis en place dans la partie granitique

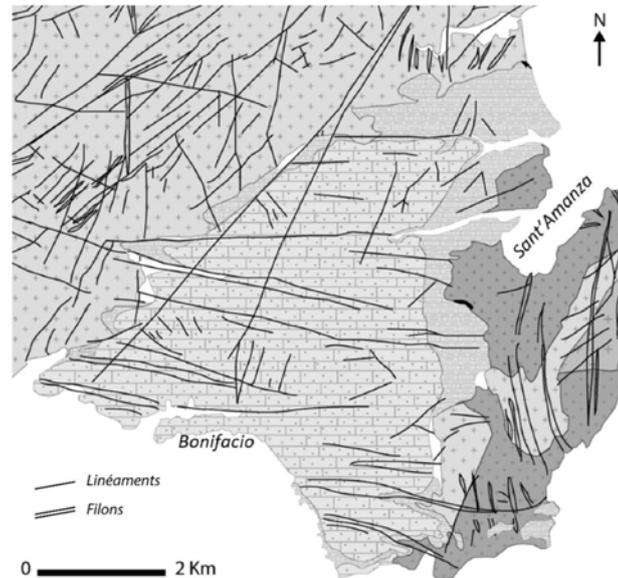


Illustration 2. Schéma de fracturation de la région, de Bonifacio

Des failles de direction NNE-SSW à N-S qui accompagnent principalement la mise en place de complexes filoniens dans les granites. Cette fracturation est majoritairement due à la rotation antihoraire du bloc corso-sarde entre 20.5 et 15 Ma (Gattacceca et al, 2007).

Des linéaments qui recoupent ce premier type sont présents à la fois dans le plateau carbonaté mais aussi dans les granitoïdes sous-jacents. Ce sont des zones de fractures d'orientation E-W plus jeunes et postérieures aux formations sédimentaires. Ces fracturations correspondent aux phases tectoniques d'extension et à la mise en place du bassin de Castel Sardo (Oudet et al., 2010) ainsi que de la marge extérieure de l'Ouest de la Corse (Orsini et al., 2010; Reynaud et al., 2012). Cette phase extensive entraîne une flexure du bord du bassin et une fracturation d'orientation E-W. (Speranza et al., 2002; Gattacceca et al., 2007).

Ces discontinuités tectoniques sont importantes car elles peuvent favoriser l'écoulement des eaux souterraines.

3. Mesures et moyens mis en œuvres sur le site de Bonifacio

3.1. RADAR GEOLOGIQUE

3.1.1. Principe du radar géologique

La méthode est présentée en annexe 1. Utilisée depuis les années 1960 pour la reconnaissance des glaciers dans les régions polaires (Bailey et al., 1964; Bentley, 1964; Walford, 1964; Cook, 1973), la prospection géoradar de surface ou GPR (ground penetrating radar) est une méthode rapide et non destructive qui utilise les propriétés de propagation des ondes électromagnétiques, dans une gamme de fréquence généralement comprise entre 10 MHz et 2 GHz. Depuis les années 1980, grâce à ses propriétés haute résolution, la prospection géoradar prend une part importante dans les reconnaissances non destructives appliquées au génie civil (Xiaojian et al., 1997, Deparis et al, 2007, 2008), à l'archéologie (Vaughan, 1986; Imai et al., 1987; Stove et Addyman, 1989; Atkin et Milligan, 1992; Carcione, 1996), à l'hydrogéologie (Topp et al., 1980) et à la géologie (Gallipoli et al., 2000).

Cette technique, qui présente une forte analogie avec les méthodes de prospection sismique, consiste à enregistrer des échos d'une onde électromagnétique (EM) sur des interfaces du sous-sol, tel que des couches géologiques, des vides, des objets enterrés. L'onde EM est émise par une antenne radar (émetteur) et les ondes transmises ou réfléchies sont enregistrées sur une autre antenne déportée (récepteur, Illustration 3a). L'ensemble des signaux EM mesurés constitue un radargramme (Illustration 3b) qui représente une coupe du sous-sol en temps (exprimé en nanoseconde). La profondeur d'investigation dépend de la conductivité du milieu (plus le milieu est conducteur et plus l'atténuation de l'onde radar est importante) et de la fréquence des antennes (plus la fréquence est basse, plus la profondeur d'investigation est importante mais la résolution, i.e. capacité à détecter un objet, sera moins bonne). La présence de vides dans le milieu crée des réflexions énergétiques. Si les ondes radar ne sont pas atténuées par des matériaux au-dessus des vides, cette méthode géophysique est la plus pertinente pour la détection et la reconstruction de la géométrie des vides et des fractures et offre la meilleure résolution verticale et horizontale.

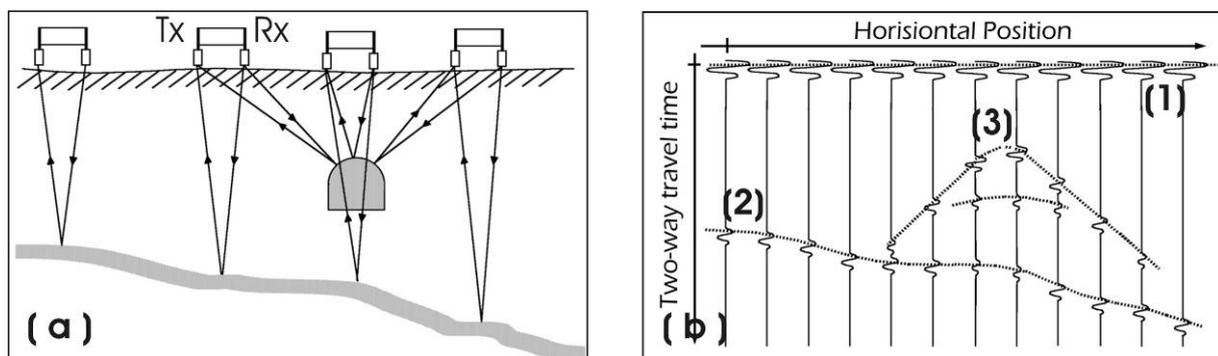


Illustration 3. Schéma de principe de l'utilisation du GPR (a) et ondes associées à une réflexion sur une interface et à une diffraction, ainsi que l'onde directe dans l'air (b), d'après Annan (2001).

3.1.2. Système d'acquisition et personnel mobilisé

La prospection radar de surface (annexe 1) ou GPR (Ground Penetrating Radar) est, dans son principe, proche de la méthode de sismique réflexion. Un transmetteur (Tx) émet des ondes électromagnétiques (EM) aux fréquences radio qui pénètrent dans le sol et se réfléchissent lorsqu'elles traversent des milieux présentant des contrastes de permittivités diélectriques, de conductivité électrique ou de perméabilité magnétique. Le signal résultant est enregistré par un récepteur (Rx), déporté de la source, en général à une distance fixe. Par contraste avec les méthodes sismiques, les instruments radar utilisent des ondes électromagnétiques (EM) générées par des antennes dont la fréquence est beaucoup plus élevée et peut varier de quelques MHz à quelques GHz. En général, ces ondes ne pénètrent pas aussi profondément que les ondes sismiques mais se caractérisent par une très forte résolution en moyenne de quelques dizaines à quelques cm. Celle-ci sera d'autant meilleure que la longueur d'onde est petite (fréquence élevée, vitesse électromagnétique faible).

Plusieurs dispositifs d'acquisition existent. Le mode réflexion (Illustration 4) est utilisé pour ce travail, que ce soit pour les acquisitions de surface, sur la falaise où en forage. Les deux antennes Tx et Rx sont à distance constante et sont déplacées régulièrement le long d'un profil. Les réflecteurs apparaissent directement sur la section radar temporelle, mais doivent subir des traitements spécifiques si les milieux présentent des structures complexes (corrections statiques, migration) ainsi qu'une conversion temps-profondeur.

L'application du radar pour détecter la fracturation au sein de falaises calcaires apparaît favorable puisque le massif rocheux est généralement électriquement résistif (d'où une bonne pénétration) et que la présence de fractures, remplies d'argile, d'air ou d'eau, va générer un fort contraste de permittivité diélectrique et/ou de conductivité diélectrique. C'est d'ailleurs la méthode la plus utilisée à l'heure actuelle pour l'imagerie des milieux fracturés sur quelques mètres de profondeur. Dans le cas de reconnaissance de falaises la technique doit cependant être appliquée directement sur la paroi pour imager les fractures sub-verticales et pour éviter la couche altérée conductrice présente à la surface du plateau.

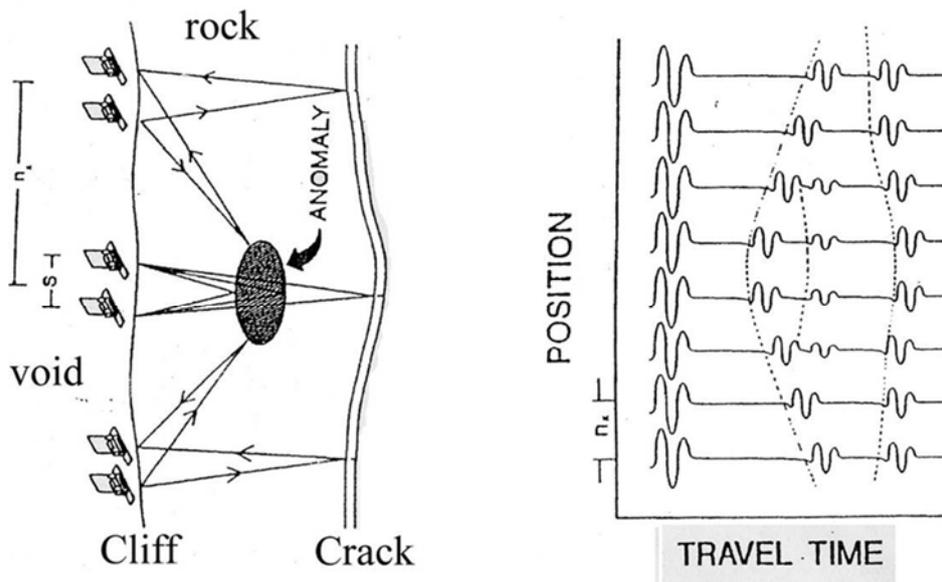


Illustration 4. Schéma de principe d'acquisition d'un profil en mode réflexion sur une falaise.

Difficultés et sécurité. Par rapport aux profils réalisés à la surface du sol, la réalisation de profils radar en falaise nécessite des adaptations du matériel géophysique et des travaux sur corde spécifiques au déploiement du matériel et les mesures précises de positionnement. Une procédure de descente et de communication, assurant à la fois l'efficacité de la prise de mesures et une sécurité optimale ont été mises au point. Lors des acquisitions sur falaise, deux personnes capables de se déplacer sur cordes doivent être présentes en permanence et tous les intervenants en surface doivent être soumis à des règles strictes de sécurité.

Dans le cadre de cette étude, le système d'acquisition radar utilisé est le ProEx de Malå Geoscience (Illustration 5).



Illustration 5. Appareillage RAMAC/GPR avec une antenne blindée de 250MHz (dans le chariot) et de 500 MHz. .

Le dispositif se compose d'une antenne émettrice et réceptrice, d'une électronique de transmission, et d'une électronique de réception. Dans notre cas, les antennes émettrices et réceptrices sont :

- Des antennes blindées de 250 MHz (Illustration 5) dans le cas des acquisitions de surface, ce qui permet de focaliser le rayonnement EM des antennes dans le sol et de limiter les réflexions parasites dans l'air ;
- Des antennes non blindées bi-statiques de 100 MHz dans le cadre des acquisitions en falaise (Illustration 6) ;
- Des antennes de forage de 100 MHz pour les diagraphies en forage.

Le système d'acquisition se compose également d'une unité de contrôle qui permet de synchroniser les différents éléments, et d'une unité de commande et de stockage des données qui permet de visualiser les données en temps réel.



Illustration 6. Appareillage RAMAC/GPR avec des antennes non blindées de 100MHz sur la falaise .

Les données radars ont été traitées afin d'éliminer les effets parasites qu'il peut y avoir dans le signal (perturbation basse et haute fréquences) et d'amplifier les arrivées des ondes réfléchies.

La chaîne de traitement est la suivante :

- Suppression de la composante continue ;
- Filtre passe bande adapté à la fréquence de l'antenne ;
- Suppression de la première arrivée (onde directe dans l'air) qui permet, dans notre cas, de visualiser les décollements potentiels directement sous la paroi ;
- Correction d'amplitude de type Automatic Gain Control (AGC), visant à amplifier les arrivées réfléchies.

3.2. PROGRAMME DES INVESTIGATIONS SUR SITE

La mission a été conduite par un agent du BRGM expérimenté et possédant une bonne pratique en matière de mesures géophysiques (électriques et électromagnétiques) et de diagraphies et encadrant l'équipe de cordiste professionnel manipulant le matériel en falaise.

Les mesures ont été faites en deux campagnes de terrain.

La première campagne de mesure s'est déroulée du 14 au 18 janvier 2019. Lors de cette semaine, il a été réalisé:

- Six profils radars (R1 à R6) de surface dans les rues de Bonifacio avec l'antenne blindée de 250 MHz ;
- Quatre profils radars en falaise (profil radar P1 à P4) avec des antennes non blindées de 100 MHz directement sur la paroi. Les travaux sur la paroi (sécurisation de la falaise, manipulation des antennes radar) ont été réalisés

par la société l'Etoile Acrobat dont le siège social est situé à Ajaccio (Corse du sud).

La deuxième campagne de mesure a été réalisée du 25 au 29 mars 2019. Lors de cette semaine, la société Lim, spécialisée dans les diagraphies de forage est intervenue à la demande du BRGM pour réaliser des diagraphies en forage. Les investigations suivantes ont été réalisées :

- Sept profils radar de surface dans les rues de Bonifacio et sur le massif au sud de la ville avec l'antenne blindée de 250 MHz ;
- Trois diagraphies radar dans les forages F1 à F3 avec l'antenne radar de forage à 100 MHz ;
- Trois diagraphies optique et Gamma Ray par la société Lim dans les forages F1 à F3.

4. Résultats

4.1. PROSPECTION RADAR DE SURFACE

4.1.1. Localisation des profils

Le positionnement des mesures a été réalisé par un GPS Trimble Geo 7x, permettant une localisation avec enregistrement en continu (1 point par seconde) ou en station avec une précision de l'ordre du centimètre, après post-traitement (c'est-à-dire après correction des données GPS brutes à partir d'éphémérides fournies par IGN). Tous les résultats de ce rapport sont présentés dans le système de projection cartographique Lambert 93.

Dans les rues de Bonifacio, ont été réalisés 13 profils radar, dont la longueur varie de 10 à 230 mètres. Leur implantation est présentée sur l'illustration 7 (R1 à R13).

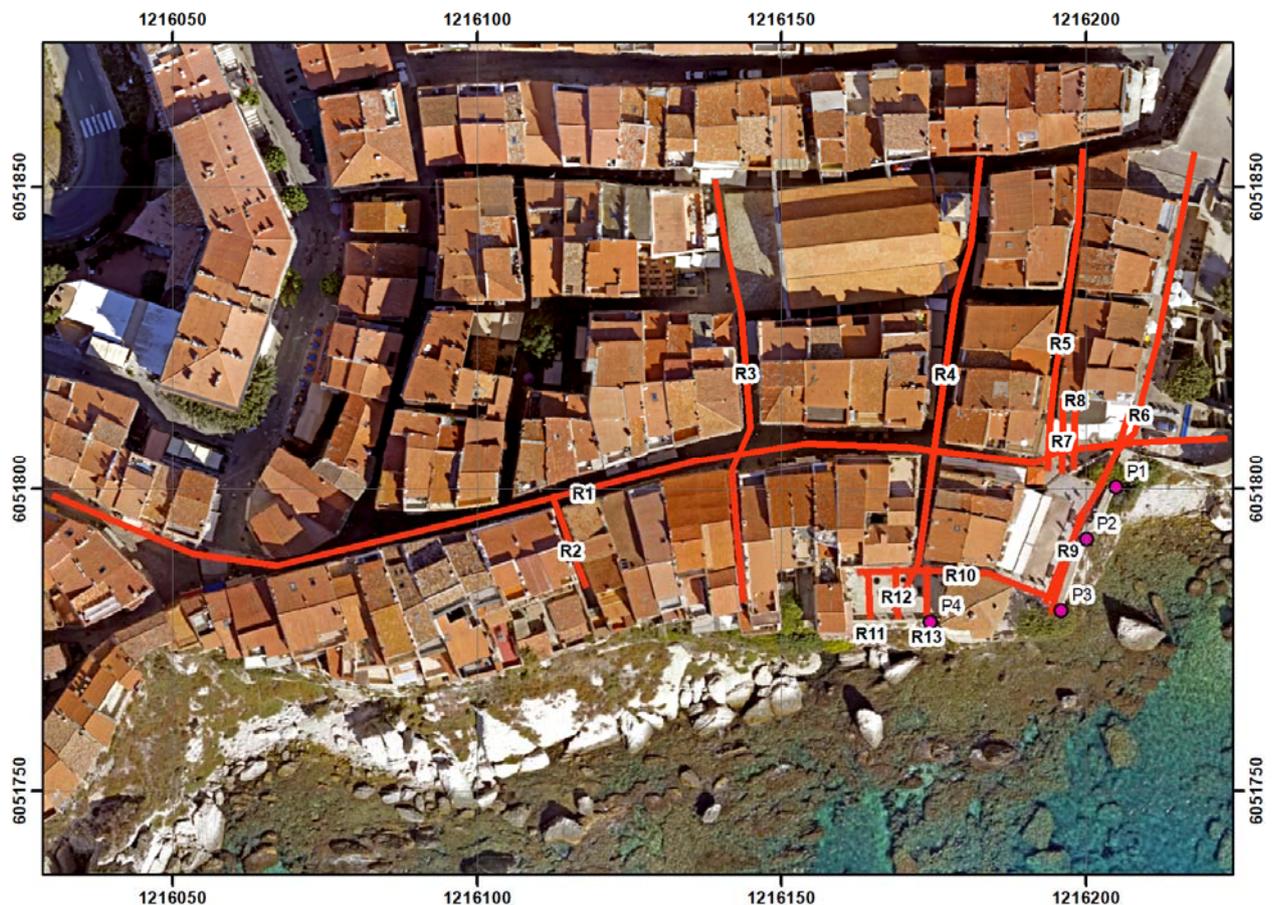


Illustration 7. Plan d'implantation des profils géophysiques dans les rues de Bonifacio. Les profils verticaux en falaise sont représentés par un cercle mauve situé au sommet du profil.

4.1.2. Interprétation

Treize profils radar en mode réflexion ont été réalisés sur le plateau. L'examen des radargrammes (Illustration 8) montre que la profondeur de pénétration est d'environ 2 m pour R5. Ce profil met en évidence le passage de caniveau (présence d'une énergie importante) à l'abscisse 22 m, la présence de canalisation à l'abscisse 47 m. D'un point de vue géologique, la présence d'une discontinuité est marquée par une étoile bleue à l'abscisse 50 m. Celle-ci se situe aux environs du passage de la faille présumée. Cette anomalie a été retrouvée uniquement sur les profils réalisés à la place du marché, excepté pour R6 et R9 car la hauteur de remblai est localement plus importante. A noter que les larges bandes horizontales sur Illustration 8 correspondent à un phénomène de résonance de l'antenne. L'illustration 9 et l'illustration 10 présentent l'ensemble des radargrammes acquis sur le plateau.

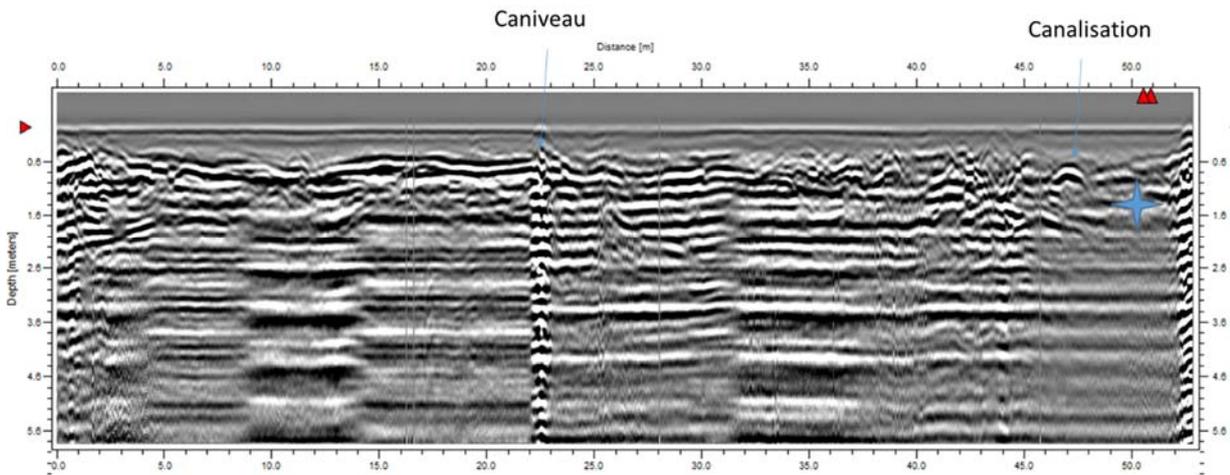


Illustration 8. Résultat et interprétation du profil radar R5. Les triangles rouges correspondent à des marques de terrain.

L'illustration 11 localise sur un plan les anomalies relevées qui correspondent à des réflecteurs discontinus (étoile bleue sur l'illustration 8). Elles se concentrent uniquement au niveau de la place du marché. Elles s'alignent selon une direction N80 qui est compatible avec la faille recherchée, malgré l'écart d'orientation (famille N110).

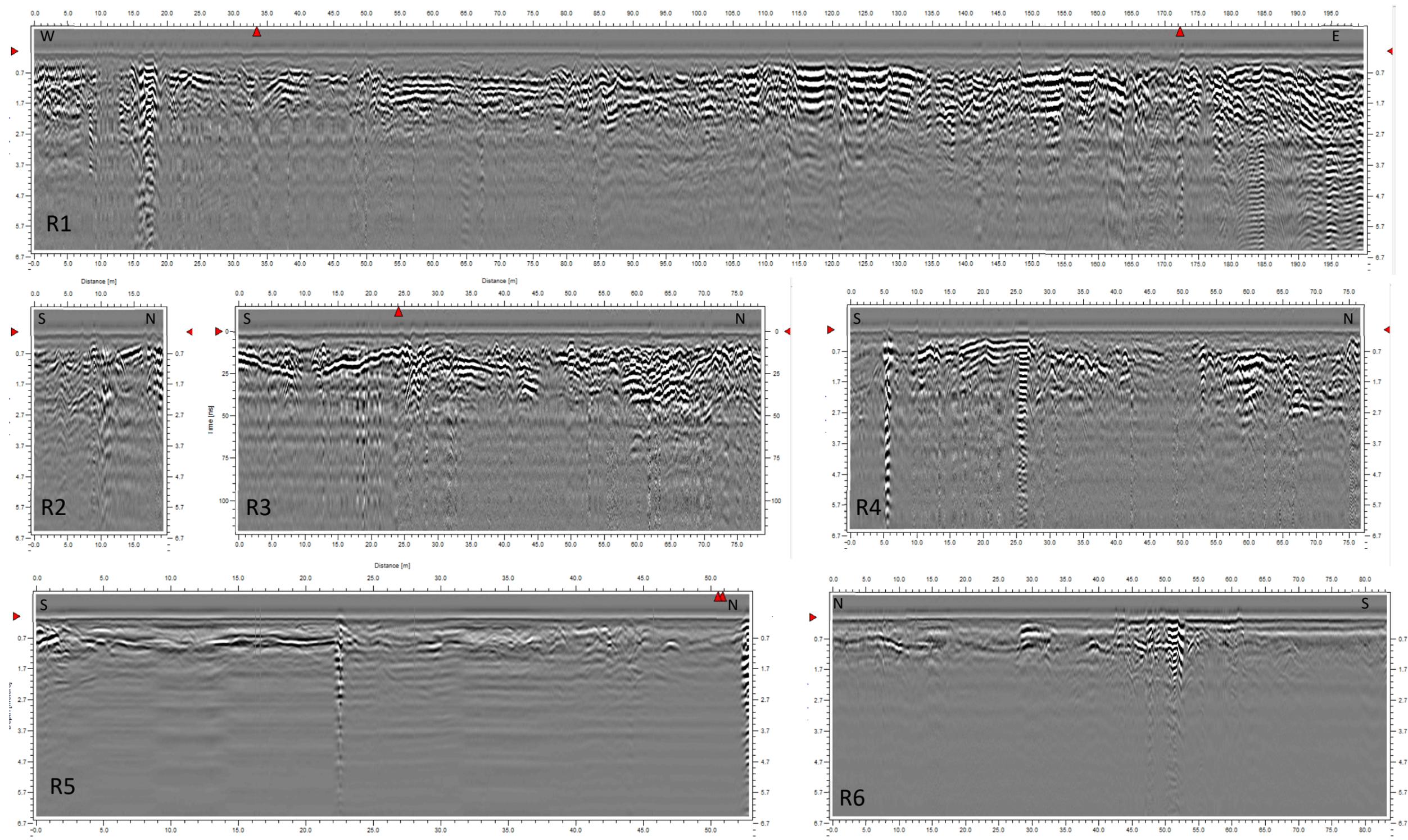


Illustration 9. Résultat et interprétation des profils radars R1 à R6

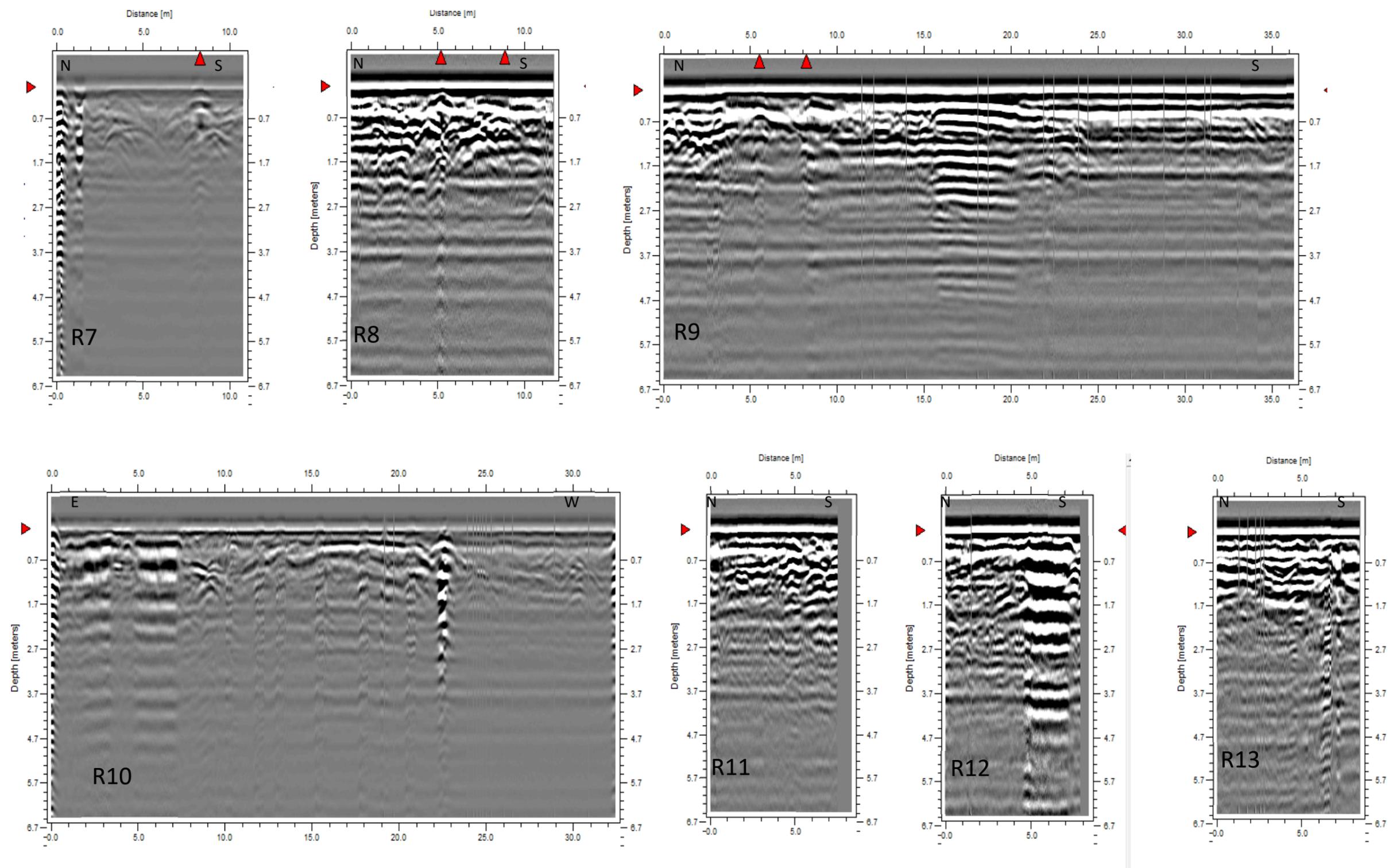


Illustration 10. Résultat et interprétation des profils radars R7 à R13.

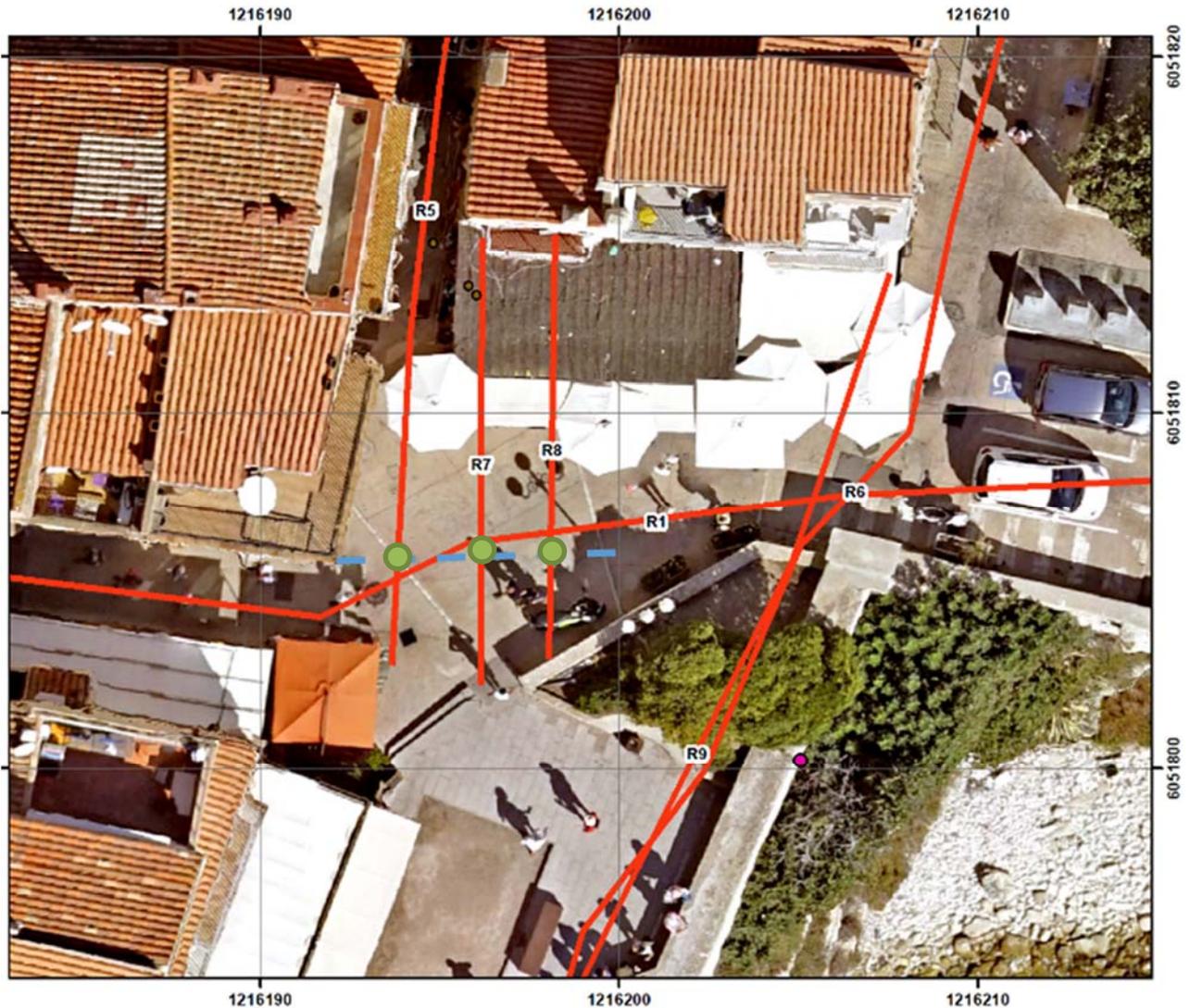


Illustration 11. Localisation des anomalies (points verts sur les profils R5, R7 et R8) pouvant marqué le passage de la faille (trait discontinu bleue).

4.2. PROSPECTION RADAR EN PAROI

4.2.1. Localisation des profils

Les antennes utilisées lors du levé en falaise sont de type non blindées. La présence d'un blindage a pour but de focaliser le rayonnement électromagnétique dans le terrain et limiter l'émission dans l'air. En contrepartie, l'énergie transmise est moindre et la profondeur de pénétration est inférieure par rapport à une antenne non blindée de même fréquence d'acquisition. Ces antennes ont été privilégiées afin d'augmenter la profondeur de pénétration, aucun obstacle n'étant susceptible de générer des réflexions d'ondes radar dans l'air.

Les profils ont été localisés en pointant sur photo des points de passage du profil radar (début, fin et changement de direction). Ce tracé a été combiné avec les résultats de l'acquisition LIDAR

afin d'exporter la topographie de la falaise. Cette combinaison du scan laser (Lidar) et des photos s'est avérée très efficace pour positionner facilement les mesures radar sur la falaise (Illustration 11). L'Illustration 11 montre le passage théorique des profils radars. Ces derniers ont une longueur moins importante.

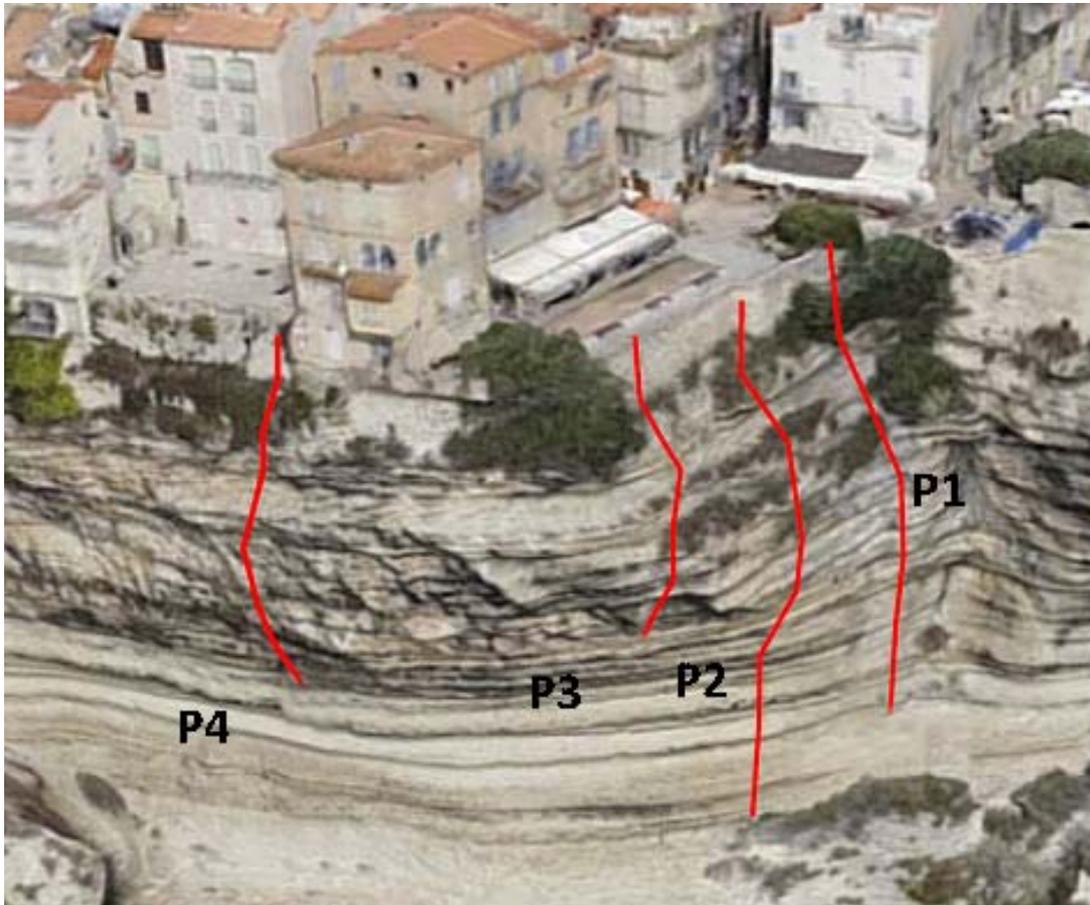


Illustration 12. Localisation des profils P1 à P4 sur la falaise.

4.2.2. Interprétation

Les profils radar pour P1, P2, P3 et P4 font respectivement 39, 50, 18 et 30 mètres de long. L'Illustration 13 montre les résultats du profil P4 après traitement sans correction topographique (Illustration 13a) et après traitement avec correction topographique et conversion temps profondeur (Illustration 13b). Ce profil montre de nombreuses bandes (cf. bandes verticales sur l'Illustration 13a pointée entre les altitudes 46 et 58 mètres) qui mettent en évidence des anomalies horizontales. L'amplitude de ces bandes est de l'ordre du mètre. Elles sont certainement liées à la stratification dense. A l'altitude de 57 m NGF, une réflexion apparaît à 380 ns environ. Puis ce dernier se rapproche de la paroi de la falaise. A l'altitude de 42 m NGF, le réflecteur se situe à 280 ns. En prenant en compte que les longueurs sont doublées (allée et retour) la vitesse de propagation de l'onde EM calculée est de 30 cm/ns, ce qui met en évidence une propagation de l'onde dans l'air. Le réflecteur observé est donc à une réflexion sur la surface de la mer. Cette réflexion est donc a priori fictive, n'a sans doute pas de nature géologique. De plus, l'application de la correction statique (Illustration 13b) induit des déformations sur cet objet. Elle ne caractérise pas une fracture au sein du massif investigué et que ces investigations en paroi ne permettent pas d'observer ou de préciser l'état de fracturation parallèle à la paroi au sein du massif. La profondeur d'investigation maximale est de l'ordre de 2

m, ce qui est très faible dans ce type de milieu. Ceci es certainement dû à la stratification horizontale sub-métrique, d'amplitude proche de la longueur d'onde du signal émis et qui a pour conséquence d'atténuer fortement le signal.

Les profils P2 et P3 montrent les mêmes résultats. Le profil P1 ne présente pas ce réflecteur fictif car au droit du profil, il y a une zone chaotique et non plane. Aucun réflecteur majeur n'a été observé sur l'ensemble des profils. Les radargrammes sont données en annexe 2.

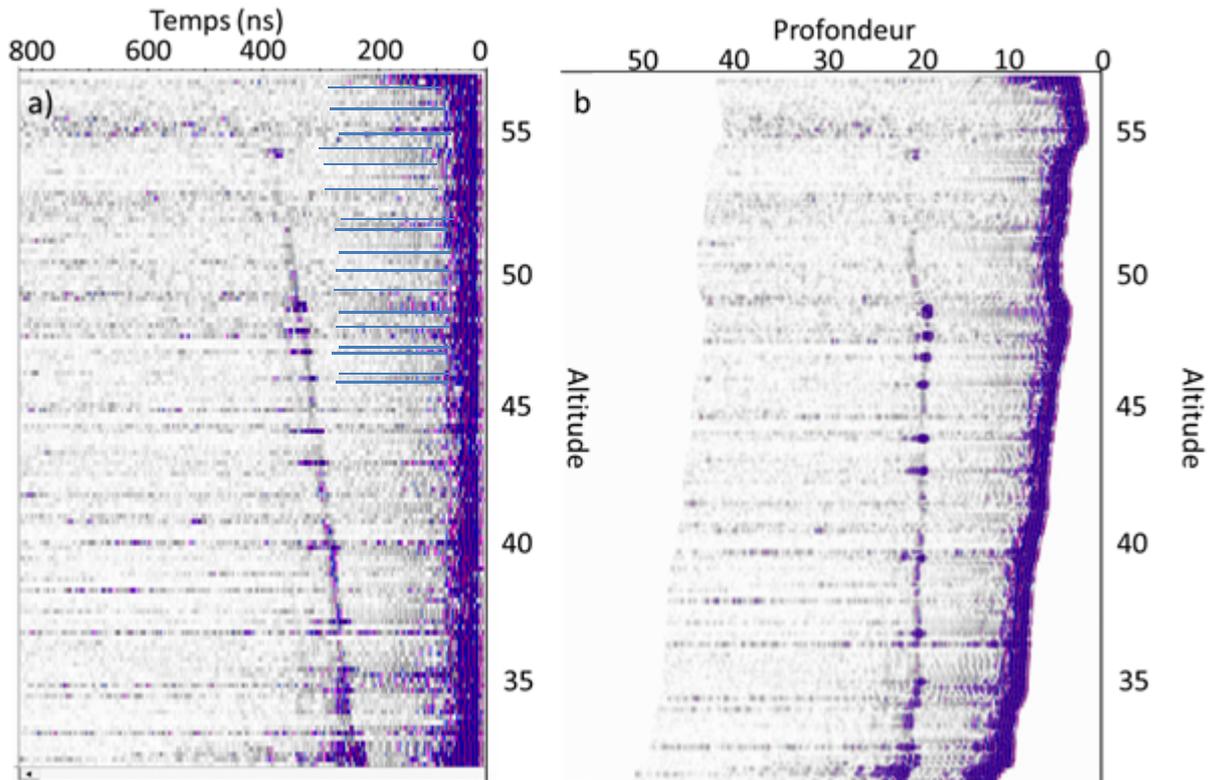


Illustration 13. Image radar du profil P4 (a) le radargramme après traitement pour l'antenne 100 MHz sans correction topographique, la figure b) montre le radargramme après traitement et avec correction topographique

4.3. DIAGRAPHIE EN FORAGE

4.3.1. Localisation des profils

Les diagraphies ont été réalisées dans les forages F1, F2 et F3 de longueurs respectivement de 40.5, 45 et 60 m. La localisation des forages est montrée sur l'illustration 14 et les coordonnées sont présentées dans le Tableau 1

Forage	Profondeur (m)	Localisation (lambert93)
F1 (SC3)	40.5	E(m):1216194,81 – N(m):6051814,78
F2 (SC2)	45	E(m):1216196,02 – N(m):6051813,30
F3 (SC1)	60	E(m):1216195,80 – N(m):6051813,55

Tableau 1 : Coordonnées des forages

Il a été réalisé dans chaque forage une diagraphie radar et une diagraphie optique.

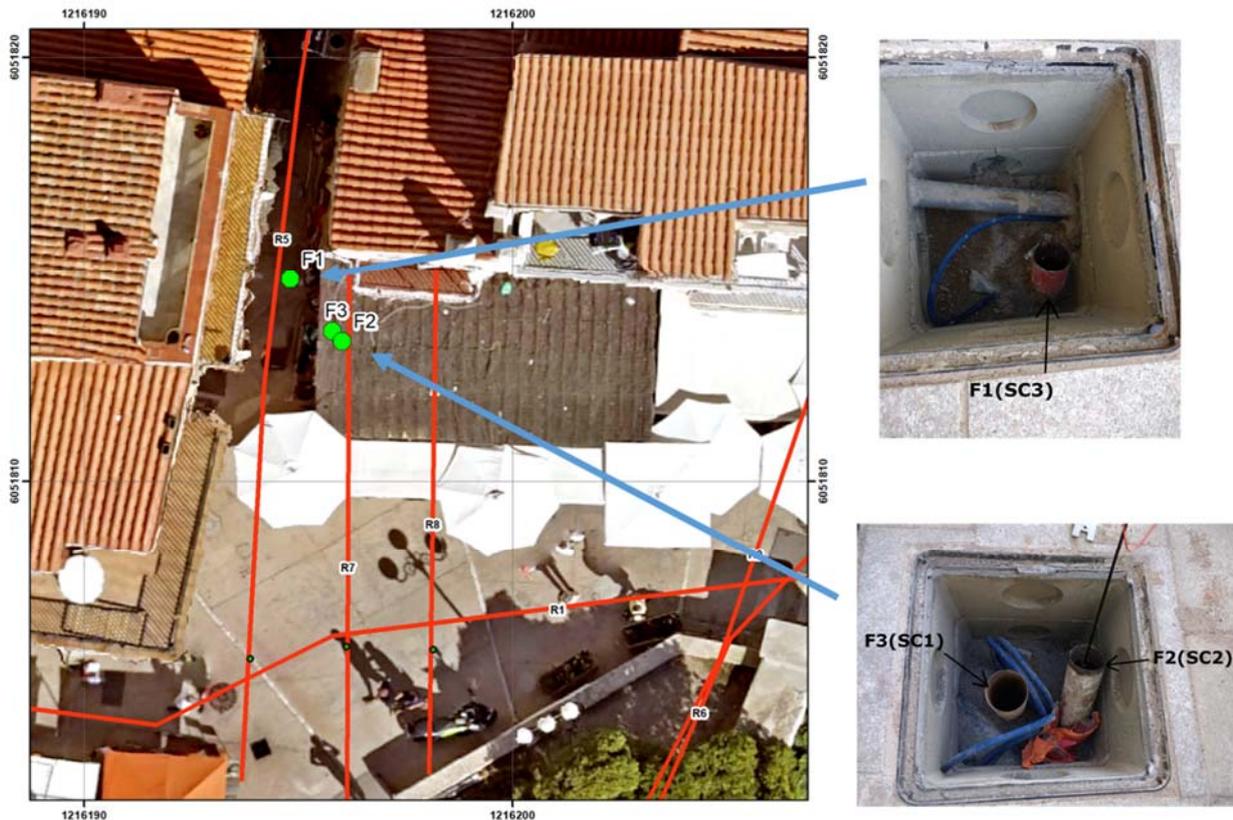


Illustration 14. Localisation des profils radar SC1, SC2 et SC3.

4.3.2. Principe des diagraphies optiques

Les diagraphies optiques ont été réalisées et interprétées par la société Lim Forage. L'atout principal de la méthode optique est de présenter des résultats comparables à ce que le géologue pourra observer sur la carotte (s'il en existe une) en y ajoutant un paramètre important qui est l'orientation des observations. L'imagerie optique nécessite impérativement un forage sec où avec une eau transparente. Les diagraphies radars ont été réalisées par le BRGM.

Au moyen d'une caméra vidéo haute résolution montée devant un objectif grand-angle de très haute qualité optique, le capteur numérique enregistre une série d'images circulaires de la paroi du forage, qui sont digitalisées dans la sonde puis rassemblées en image continue et orientée.

L'interprétation structurale se réalise à partir des images déroulées des parois du forage, réorientées soit par rapport au Nord magnétique (forage vertical jusqu'à 30°) soit par rapport au « high side » (forage incliné >30° ou horizontal). Ainsi, en regardant une image orientée par rapport au Nord magnétique, nous avons aux extrémités gauche et droite de l'image le point de la circonférence du forage aligné vers le Nord, alors que le point Sud se trouve au centre de l'image. Dans le cas d'une image orientée par rapport au « high side », nous avons aux extrémités gauche et droite de l'image le point le plus haut de la circonférence du forage, alors que le point le plus bas se trouve au centre de l'image.

Après l'importation et réorientation des images, les plans observés sont saisis directement sur cette image à l'aide du logiciel de traitement. Celui-ci calcule leurs orientations par rapport à l'axe

du forage et permet à l'opérateur de les classer dans une catégorie, parmi un nombre de catégorie prédéfinies (fractures, veines, strates, ...).

La phase suivante de l'opération consiste à « débasculer » l'ensemble des structures, en fonction de l'azimut et de l'inclinaison du forage, pour en calculer leurs orientations géographiques réelles. Les structures débasculées sont présentées sur les logs sous forme de têtards. Cette présentation permet une appréciation rapide de l'orientation de la structure concernée : son pendage est représenté par la position du corps du symbole sur un grillage allant de 0° (horizontal) à 90° (vertical), alors que l'orientation de la queue du têtard donne la direction de pendage (par rapport au Nord magnétique).

Toutes les analyses (fréquentielles d'azimut et d'inclinaison, donnant lieu aux différents stéréogrammes, rosaces et histogrammes) sont naturellement réalisées sur les fractures débasculées.

4.3.3. Interprétation

Forage F1

L'illustration 15 présente la diagraphie radar (a) et optique (b) réalisée dans le forage F3. La profondeur d'investigation du radar est très faible et de l'ordre de 4 m au maximum. En effet, aucun réflecteur n'apparait au-delà de cette profondeur. Les résultats montrent la présence de fracture situé essentiellement dans les dix premiers mètres. L'analyse des données des diagraphies optiques a été réalisé par Lim forage.

De plus, les données radar montrent que les fractures sont essentiellement présentes de 0 à 15 m de profondeurs.

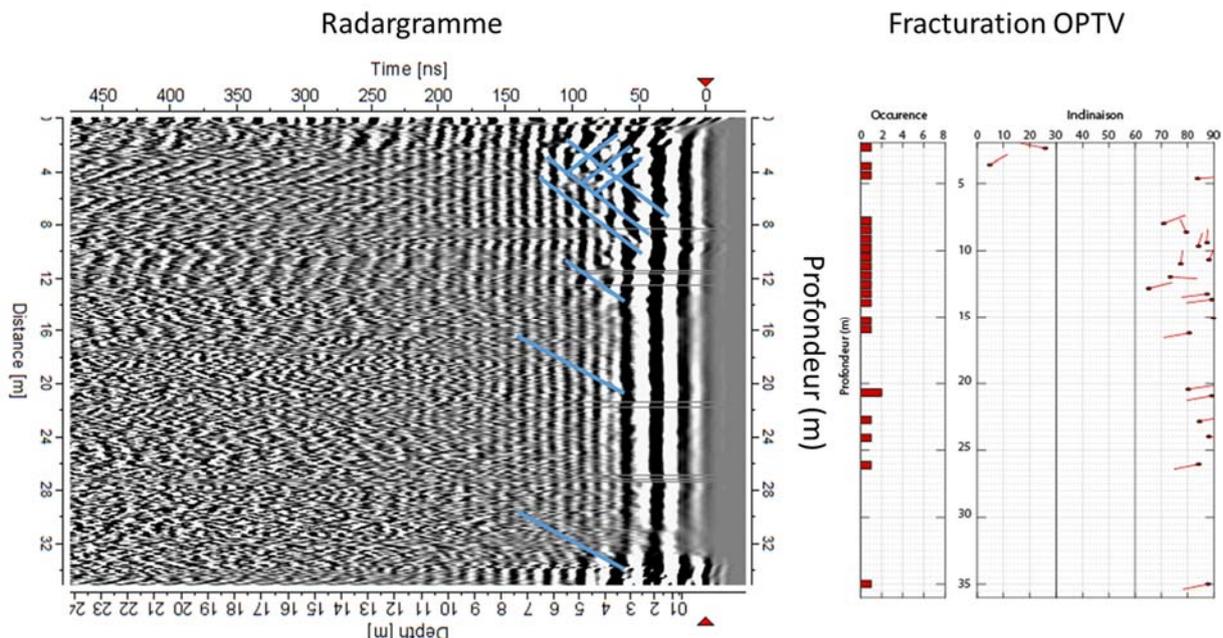


Illustration 15. Diagraphies radar et optique réalisée, dans le forage F1 a) le radargramme après traitement et interprétation des réflecteurs (traits bleus sur le radargramme) pour l'antenne 100 MHz, la figure b) le résultat du pointé des fractures à partir de l'image optique

Le forage est dans l'ensemble peu fracturé. Le niveau d'eau est rencontré à 35,3 m.

Les fractures sont sub-verticales et ont une direction de pendage globalement Nord jusqu'à la fracture majeure repérée à 10,70 m de profondeur. Au-delà de 10,70 m, les fractures sont toujours sub-verticales mais de direction N70 et N250.

La fracture principale correspondant vraisemblablement à celle repérée en falaise est bien ouverte. Effectivement, des dépôts noirs sont présents sur la paroi du forage de la surface jusqu'à cette fracture (à 10,70 m de profondeur) mais pas au-delà.

Cette fracture est présentée sur la figure suivante. Les pendages des strates sont globalement faibles entre 5° et 20° et de direction Sud-Ouest (N245).

L'Indice global de densité de discontinuités. Le Rock Quality Designation (RQD) est déterminé en mesurant le pourcentage de récupération de morceaux de carotte de forage dont la longueur est supérieure à 100 mm. L'indice RQD est défini par la somme de la longueur des échantillons de forage supérieurs à 10 cm divisé par la longueur totale du forage.

Pour ce forage l'indice global de densité (ID) moyen est de 12 cm, ce qui correspond à un ID de 4, correspondant à une densité « forte » de discontinuités dans le massif rocheux (importance de la stratification).

Le RQD global a une valeur de 1, quelle que soit la longueur de la passe considérée (1, 2 ou 3 m), correspondant à un RQD supérieur à 90 %, soit une densité de fracturation « très faible ».

La fréquence des discontinuités FD (nombre de discontinuité par mètre) moyen est de 1 pour la fracturation, correspondant à une fréquence de discontinuités très faible alors que le FD pour la stratification est de 4 (fréquence des discontinuités forte).

L'analyse de l'espacement des discontinuité (ES) pour la fracturation indiquent des discontinuités espacées alors que pour la stratification elles sont rapprochées.

Du fait de la faible profondeur d'investigation des diagraphies radar, les données radar n'apporte pas plus d'information.

Forage F2

L'

Illustration 16 présente les diagraphies radar (a) et optique (b) réalisées dans le forage F2. La profondeur d'investigation du radar est très faible et de l'ordre de 4 m au maximum. Les résultats montrent la présence de fracture située essentiellement dans les dix premiers mètres. L'analyse des données des diagraphies optiques a été réalisé par Lim forage.

De plus, les données radar montrent que les fractures imagées recoupent tout le forage et qu'il n'y a pas de fracture visible dans une circonférence de 4 m autour du forage (i.e. profondeur d'investigation).

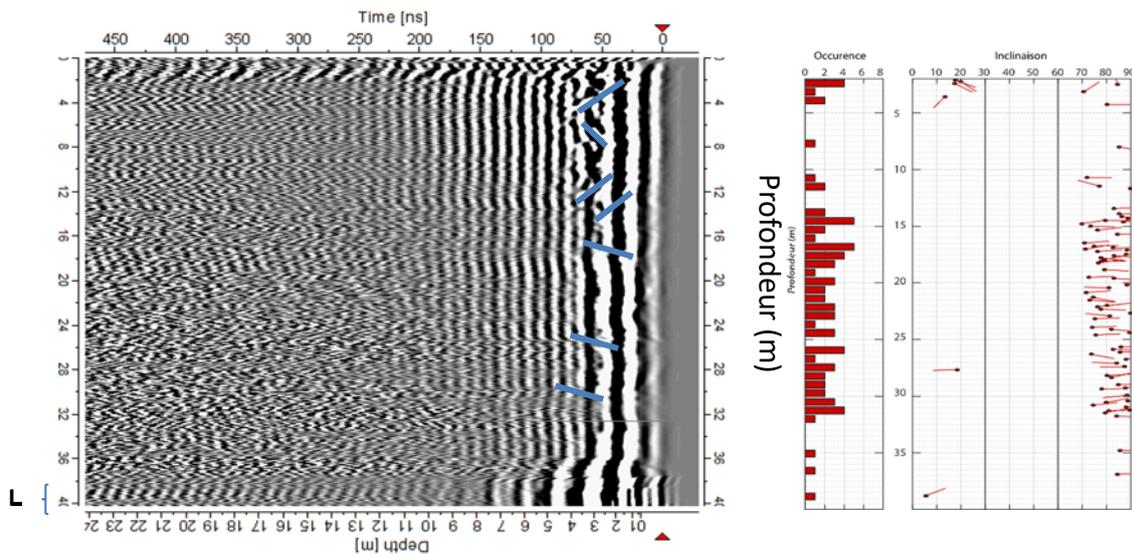


Illustration 16. Diagraphies radar et optique réalisées dans le forage F2. a) le radargramme après traitement et interprétation des réflecteurs (traits bleus sur le radargramme) pour l'antenne 100 MHz, b) résultat du pointé des fractures à partir de l'image optique

Le niveau d'eau est rencontré à 39,25 m sur la mesure effectuée à la descente. Les pendages des strates sont globalement faibles entre 5° et 10° et de direction Sud-Ouest (N235).

Les fractures sont quant à elles sub-verticales de direction de pendage principalement Est. Une zone plus altérée est visible vers 27,70 m (petit karst). A noter également l'apparition d'un dépôt couleur ocre au niveau de la fracture située à 13,4 m ainsi que au niveau de la zone altérée à 28,50 m (fracture bien ouverte, écoulement d'eau possible). Globalement, les fractures repérées sont présentes sur un seul banc.

Pour ce forage l'ID moyen est de 12 cm, ce qui correspond à un ID de 4, correspondant à une densité « forte » de discontinuités dans le massif rocheux (importance de la stratification). Le RQD global a une valeur de 1, quelle que soit la longueur de la passe considérée (1, 2 ou 3 m), correspondant à un RQD supérieur à 90 %, soit une densité de fracturation « très faible ».

Le FD fait apparaître un niveau plus fracturé entre 14 m et 32 m de profondeur (indice de 3). La FD pour la stratification est de 4 au-delà de 13 m de profondeur (fréquence des discontinuités forte).

Les données de l'ES pour la fracturation indiquent des discontinuités espacées alors que pour la stratification elles sont plus rapprochées.

Du fait de la faible profondeur d'investigation des diagraphies radar, les données radar n'apporte pas plus d'information.

Forage F3

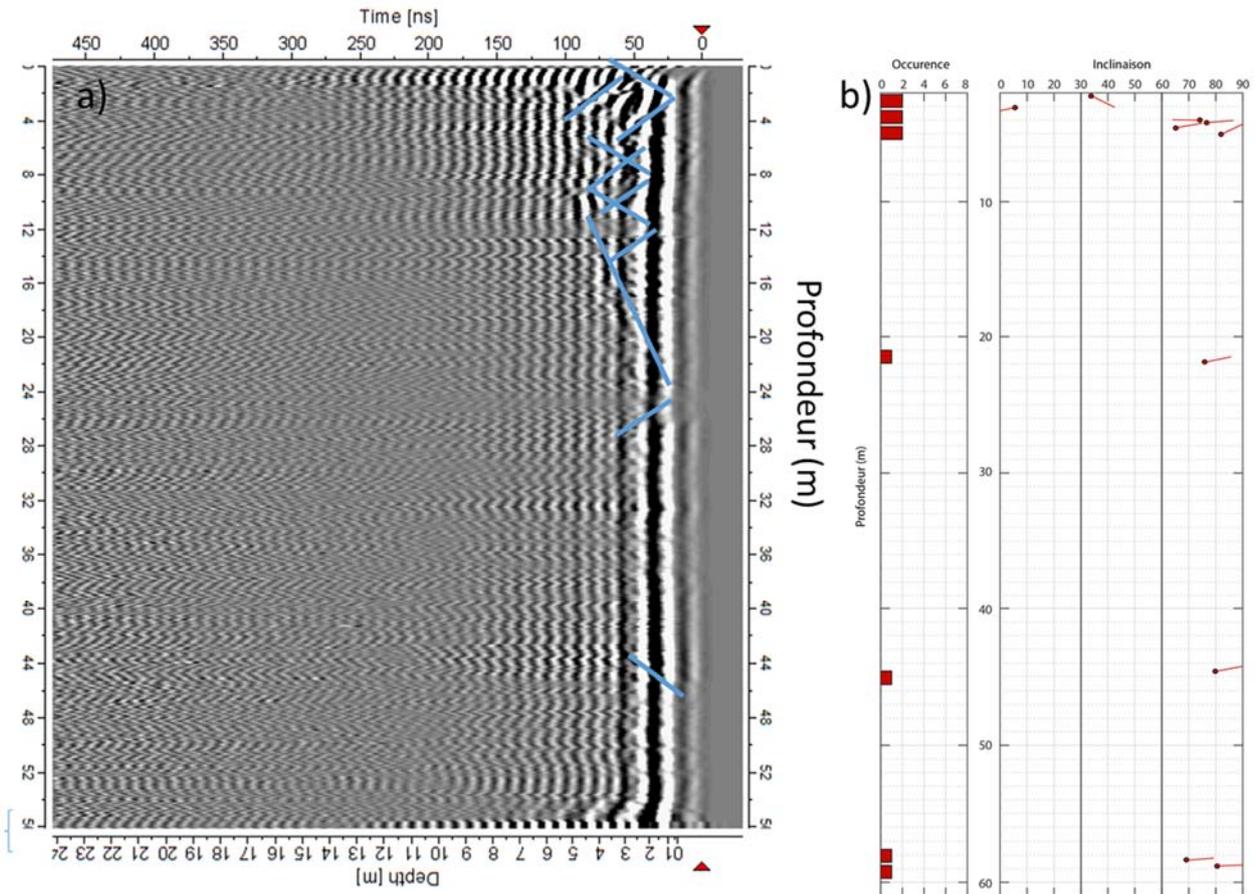


Illustration 17. Diagraphies F3. La figure a) montre le radargramme après traitement et interprétation des réflecteurs (traits bleus sur le radargramme) pour l'antenne 100 MHz, la figure b) montre le résultat du pointé des fractures à partir de l'image optique

L'illustration 17 présente les diagraphies radar (a) et optique (b) réalisées dans le forage F3. La profondeur d'investigation du radar est très faible et de l'ordre de 4 m au maximum. Les résultats montrent la présence de fractures situées essentiellement dans les dix premiers mètres. L'analyse des données des diagraphies optiques a été réalisée par Lim forage.

De plus, les données radar montre que les fractures imagées recoupent toutes le forage et qu'il n'y a pas de fracture visible dans une circonférence de 4 m autour du forage (i.e. profondeur d'investigation).

Le niveau d'eau est rencontré à 58,9 m sur la mesure effectuée à la descente.

Des petites fractures sont présentes sur ce forage. La direction de pendage est majoritairement de direction Est. Le pendage quant à lui est sub-vertical. Concernant la stratification, comme sur les précédents forage, l'inclinaison est faible entre 10 et 25° pour une direction de pendage N 245.

Pour ce forage l'ID moyen est de 17 cm, ce qui correspond à un ID moyen de 4, correspondant à une densité « forte » de discontinuités dans le massif rocheux. Au-delà de 30m de profondeur, la densité des discontinuités devient plus faible.

Le RQD est de 1 correspondant à un RQD supérieur à 90 %, soit une densité de fracturation « très faible ».

Le FD moyen est de 1 pour les fractures, correspondant à une fréquence de discontinuités très faible. La fréquence des discontinuités concernant la stratification est plus forte sur la partie haute du forage puis devient plus faible au-delà des 30 m.

L'ES est de 1 pour les fractures, correspondant à des discontinuités globalement très espacées. Concernant la stratification, les discontinuités sont rapprochées jusqu'à 30 m de profondeur puis deviennent plus espacées.

Du fait de la faible profondeur d'investigation, les données radar n'apporte pas plus d'information.

Synthèse

Le Tableau 2 présente la synthèse de l'ensemble des résultats des diagraphies.

	F1 (SC3)	F2 (SC2)	F3 (SC1)
Fracturation	Nombre pointé :21 Inclinaison : >85° Orientation : N20 et N110° Fracture importante à 10,7m	Nombre pointé :76 Inclinaison : >80° Directions :Ouest	Nombre pointé :10 Inclinaison : >80° Directions :Est
Stratification	Nombre pointé :262 Inclinaison : 8° Direction :N245	Nombre pointé :274 Inclinaison : 7° Direction :N235	Nombre pointé :337 Inclinaison : 10° Direction :N245
ID	4	4	4
RQD	1	1	1
FD	Fracture : 1 Stratification:4	Fracture : 2 Stratification:3	Fracture : 1 Stratification:3
ES	Fracture : 2 Stratification:4	Fracture : 3 Stratification:4	Fracture : 1 Stratification:4

Tableau 2 : Synthèse des résultats des diagraphies

5. Conclusions

Le secteur de la Citadelle de Bonifacio est concerné par deux types de phénomènes pouvant affecter la falaise sur laquelle la ville haute est établie : la « chute de petits blocs » (<1 m³), et « l'éboulement en grande masse ». Ce *dernier aléa* est problématique puisque qualifié de fort à très fort dans le secteur de la citadelle où la falaise forme un surplomb avec un dévers maximum d'environ 20 m.

L'étude détaillée de la stabilité du pilier de la Citadelle de Bonifacio, engagée depuis 2018 par les services de l'Etat et confiée aux opérateurs BRGM, INERIS et CEREMA, doit permettre notamment d'évaluer le volume rocheux mobilisable et de préciser sa stabilité à court comme à long terme. Dans ce cadre, plusieurs types d'investigations et suivis ont été menés afin de préciser le modèle géologique, géométrique et géomécanique du compartiment étudié et de comprendre les mécanismes influant sur sa stabilité.

L'étude détaillée des aléas engagée devrait permettre d'évaluer davantage le volume rocheux mobilisable, mais également, sur la période des investigations (dix-huit mois), de détecter – ou non - d'éventuels mouvements pouvant être rapportés à une évolution topographique dudit volume rocheux et les distinguer d'autres mouvements naturels (effets de la température, notamment) ou liés à l'activité anthropique. Les résultats obtenus sur la période feront partie des éléments techniques d'appréciation de la prédisposition au mouvement de la masse rocheuse potentiellement instable de la Citadelle.

Dans le cadre de cette étude, le BRGM a réalisé une opération géophysique en deux temps :

- Détection de la fracturation depuis la surface (depuis le haut de falaise et en paroi)
- Détection de la fracturation depuis un forage recoupant les fractures principales.

Le but de la contribution géophysique était de détecter la fracturation en arrière de la paroi de falaise, et d'en établir la géométrie. La pénétration limitée des ondes EM dans les roches de Bonifacio (inférieur à quatre mètres) n'a pas permis d'apporter des éléments concrets à ce niveau.

La prospection géophysique de surface a permis, quant à elle, de préciser la localisation de la partie sommitale d'une fracture aux abords de la place du marché.

Enfin, les diagraphies radars et optiques dans les forages F1, F2 et F3 ont permis de caractériser la fracturation et la stratification de la roche au niveau de la place du marché. En particulier la fracture principale pouvant éventuellement découper le surplomb rocheux a été imagée par les deux méthodes

6. Bibliographie

- Cerema, 2013. Réalisation de la carte multi-aléas « mouvement de terrain » et « hydraulique » dans les secteurs à enjeux de la commune de Bonifacio. N° d'affaire 10R000046.
- Cerema, 2014. Bonifacio – secteur de la Citadelle – Détermination de l'aléa éboulement. N° d'affaire C14MN0073.
- Deparis, J., S. Garambois, and D. Hantz, 2007, On the potential of ground penetrating radar to help rock fall hazard assessment: A case study of a limestone slab, Gorges de la Bourne French Alps: *Engineering Geology*, 94, 89–102.
- Deparis, J., and S. Garambois, 2009, On the use of dispersive APVO GPR curves for thin-bed properties estimation: Theory and application to fracture characterization: *Geophysics*, 74, no. 1, J1–J12.
- Frayssines, M., Hantz, D., 2006. Failure mechanisms and triggering factors in calcareous cliffs of the subalpine ranges (french alps). *Engineering Geology* 86, 256–270.
- Malascrabes, M., C. Franck, C., Vignerot, B.. Bloc 3A : Modèle Global Amélioration de la connaissance de l'aléa effondrement, Rapport Provisoire

Annexe 1

Méthode Radar

Présentation

La méthode du radar géologique est une méthode d'imagerie du sous-sol basée sur la propagation des ondes radar dans les sols, les roches ou tout autre milieu à ausculter. Elle permet de détecter des structures présentant des caractéristiques contrastées par rapport à leur environnement (permittivité électriques) : des objets isolés ou des interfaces dans le proche sous-sol.

Les ondes radars sont caractérisées par leur fréquence qui détermine en partie leur pénétration et leur pouvoir de résolution ; Les matériaux sont caractérisés par leur constante diélectrique qui détermine la vitesse de propagation des ondes et leur résistivité qui détermine leur pouvoir d'absorption.

Mise en œuvre (figure 1)

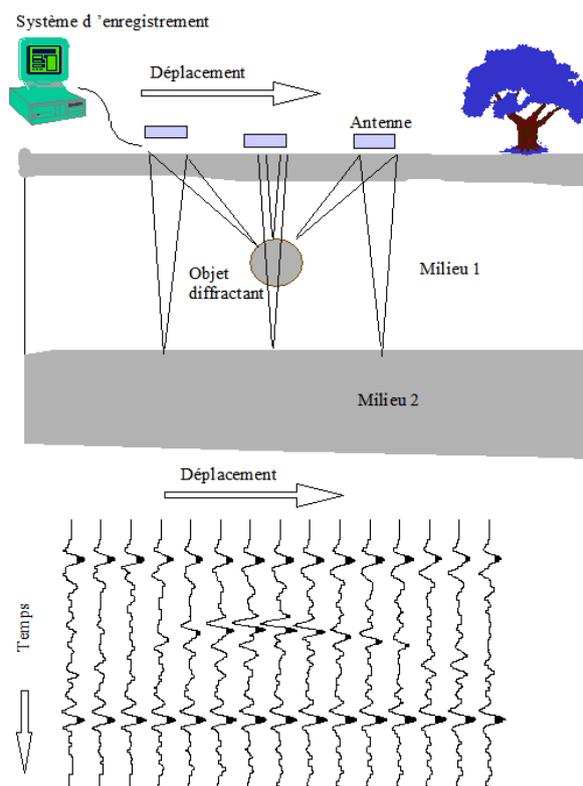


Figure 1 : Principe du radar géologique : mise en oeuvre

Pour effectuer la prospection, on utilise deux antennes posées au sol.

L'antenne émettrice envoie une onde électromagnétique dans le sol. L'onde est en partie réfléchiée par les structures du sol vers l'antenne réceptrice.

L'antenne réceptrice permet l'enregistrement en fonction du temps des ondes réfléchies.

Le déplacement simultané des deux antennes permet l'enregistrement du profil.

L'interprétation des profils permet de détecter et de localiser les hétérogénéités du sous-sol.

Les antennes sont reliées par câble à une unité de contrôle et d'enregistrement. Dans la pratique, les deux antennes sont le plus souvent réunies dans un même boîtier, traîné sur le sol ou sur la paroi par un opérateur ; elles peuvent également être tractées ou portées par un véhicule.

Comme l'enregistrement des ondes est effectué en fonction du temps, la connaissance des vitesses de transmission des ondes dans le sol est nécessaire pour obtenir la

profondeur des objets détectés ; Ces vitesses peuvent être évaluées directement sur les enregistrements ou mesurées par des méthodes spécifiques.

Pénétration et pouvoir de résolution

La pénétration des ondes radar dans le sol dépend essentiellement de deux facteurs : la fréquence d'émission utilisée et la conductivité électrique du sol.

Plus la fréquence sera basse, plus la pénétration sera importante ; en contrepartie, l'utilisation de basses fréquences présente l'inconvénient de diminuer le pouvoir de résolution de la méthode : Plus la fréquence utilisée sera élevée, plus les objets détectables par la méthode seront petits.

Pour une fréquence donnée, un sol électriquement conducteur ou contenant des éléments magnétiques atténuera fortement les ondes radars. En général, en Europe, la profondeur d'investigation est souvent limitée entre 2 et 5 m de profondeur à cause de l'humidité du proche sous-sol, et à cause de la présence de minéraux argileux générés par l'altération superficielle des roches. Les grandes pénétrations (10 m et plus) ne sont atteintes que dans des milieux particuliers comme les sables dunaires ou les roches saines (calcaires ou granit) quand elles sont décapées à l'occasion de travaux de terrassement ou dans les carrières.

Gamme de fréquences

Les fréquences utilisées couramment sont les suivantes :

Gamme de fréquence	Objectifs généraux
1 000 à 2 500 MHz	Auscultation d'ouvrage, par exemple structure des chaussées ou des ferrillages, etc.
100 à 1 000 MHz	Recherche d'objets ou de structures superficielles dans les projets de génie civil ou d'archéologie, par exemple détection de citernes, fûts métalliques, réseaux de toutes natures, etc.
20 à 100 MHz	Recherche d'objet ou structures géologiques par exemple les stratifications.

Interprétation (figure 2)

Les objets discordants par rapport aux structures du massif étudié sont généralement clairement identifiables sur les enregistrements à cause des figures de diffraction qu'ils génèrent (hyperboles) ; c'est le cas des réseaux enterrés, des vides de petites taille, des blocs isolés, de tous les éléments d'origine anthropique (fûts, citernes ou autres éléments métalliques).

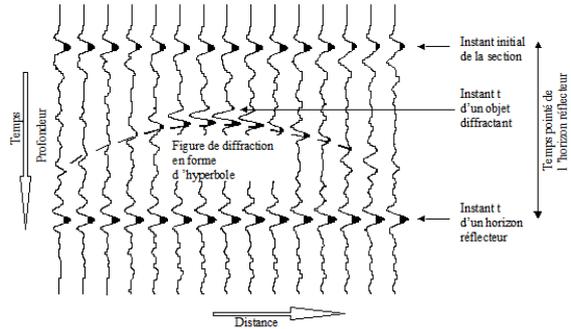


Figure 2 : Principe du radar géologique : pointé sur film

Outre ces figures particulières, l'interprétation est également basée sur les amplitudes des ondes ; en effet une amplitude forte est le signe d'une réflexion des ondes contre une interface associée à un fort contraste de vitesse de propagation : c'est l'indicateur d'une frontière nette entre deux milieux de natures très différentes (vides, objets métalliques).

Les interfaces géologiques (limites de couches, bases de remblais, etc.) produisent des réflexions généralement moins marquées, plus ou moins continues et régulières.

Annexe 2

Profils Radar

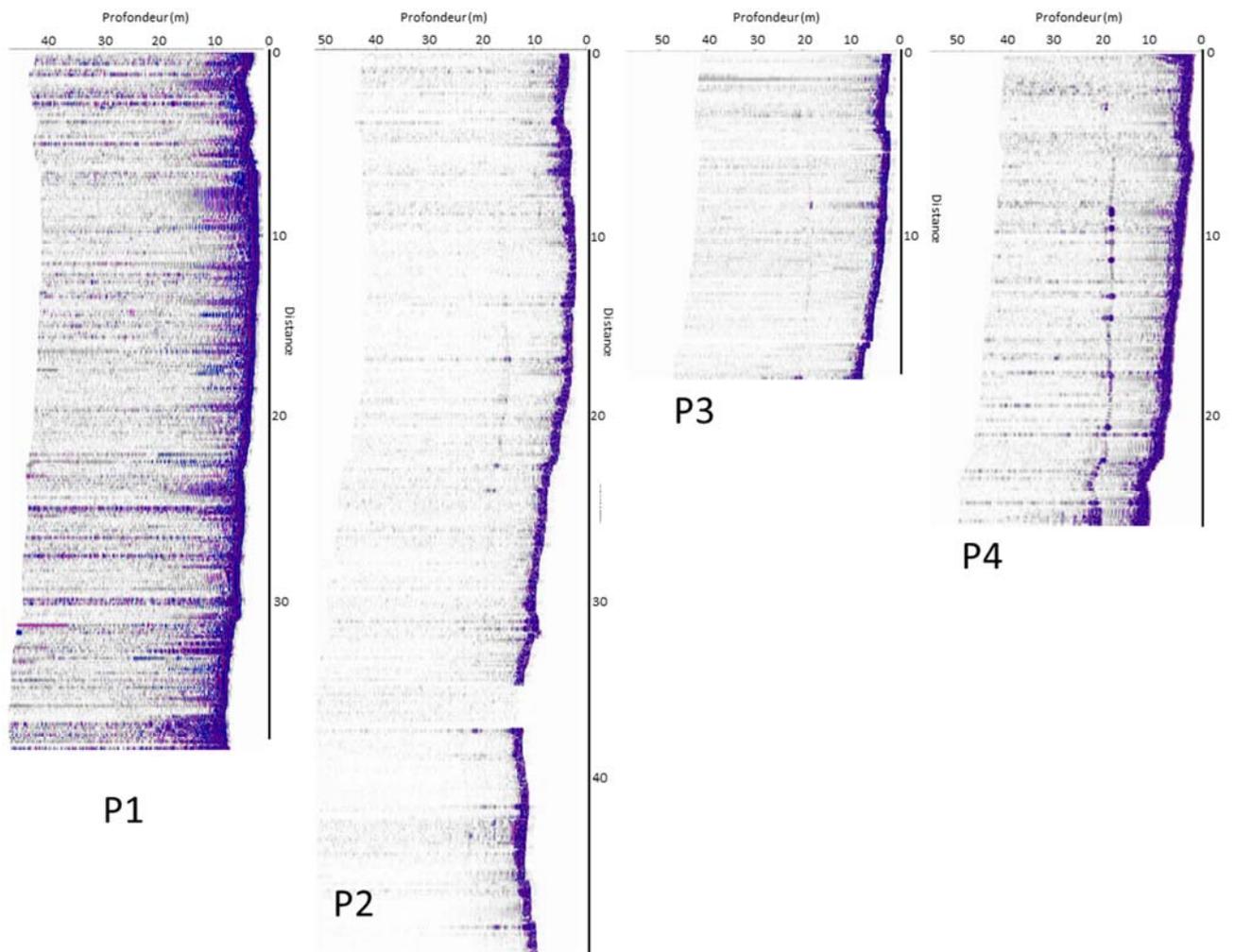


Illustration A1 - Profil Radar P1 à P4



Centre scientifique et technique
Direction Risque et Prévention (DRP)
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34
www.brgm.fr