



RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE

Liberté  
Égalité  
Fraternité



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

Document à accès immédiat

# Détermination de la présence de gypse dans la calanque du Pin de Galle, le Pradet (Var, 83)

Rapport final

**BRGM/RP-72347-FR**

Version finale du 24 mars 2023

Étude réalisée dans le cadre des projets de recherche et développement

**Cartannaz C., Moulin M., Portal A., Ardito L., Berland M., Bitri A., Ibba M., Maurice B.**

Vérificateur :	Approbateur :
Nom : Lacquement F.	Nom : Duhamel Achin I.
Fonction : Géologue 089 3740 46 625 5	Fonction : Directrice régionale PACA
Date : 16/02/2023	Date : 31/03/2023
Signature : 	Signature : 

Le système de management de la qualité et de l'environnement du BRGM est certifié selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Contact : [qualite@brgm.fr](mailto:qualite@brgm.fr)

## Votre avis nous intéresse

Dans le cadre de notre démarche qualité et de l'amélioration continue de nos pratiques, nous souhaitons mesurer l'efficacité de réalisation de nos travaux.

Aussi, nous vous remercions de bien vouloir nous donner votre avis sur le présent rapport en complétant le formulaire accessible par cette adresse <https://forms.office.com/r/yMgFcU6Ctg> ou par ce code :



**Mots clés :** Risque naturel, Gypse, Affaissement, Glissement, Géologie, Géophysique, Méthode sismique, Sismique réflexion, Méthode électrique, Hydrogéologie, Géochimie, Provence-Alpes-Côte d'Azur, Var, le Pradet, Pin de Galle.

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

**Cartannaz C., Moulin M., Portal A., Ardito L., Berland M., Bitri A., Ibba M., Maurice B.** (2023) – Détermination de la présence de gypse dans la calanque du Pin de Galle, le Pradet (Var, 83). Rapport final. BRGM/RP-72347-FR, 124 p., 40 fig., 3 tabl., 4 ann.

© BRGM, 2023, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.  
IM003-MT008-P2-22/09/2022

## Synthèse

La commune du Pradet, dans le département du Var, est concernée par des problèmes de mouvements de terrain depuis de nombreuses années, et notamment dans le secteur du Pin de Galle avec un glissement de terrain en 1976 et, selon le DICRIM, un écroulement brutal de la falaise en décembre 2014 après des épisodes de pluies intenses. Ce dernier événement a conduit à un arrêté de catastrophe naturelle le 6 décembre 2014, et deux arrêtés municipaux n°14-ARR-TEC-235 et n°15-ARR-TEC-079 pour en restreindre l'accès. Ce secteur vulnérable est à enjeux du fait de la présence de nombreuses habitations construites dans la pente de la calanque donnant sur la mer et d'une petite plage en contrebas fortement fréquentée. Depuis, plusieurs études géotechniques, une cartographie de l'aléa glissements de terrain et des propositions de travaux de confortement sur ce secteur ont été proposées à la commune par différents bureaux d'études.

Les mécanismes à l'origine du glissement peuvent être multiples, mais la présence potentielle d'évaporites n'avait jusqu'à présent pas été considérée. Du gypse (ou anhydrite) a déjà été observé, associé à des zones de fontis et désordres de surface situées plus à l'Est sur la commune par le BRGM et le CEREMA. La présente étude proposée par le BRGM vise à déterminer s'il existe une continuité géologique et structurale afin de vérifier la susceptible présence de gypse au Pin de Galle. Des évaporites dans le sous-sol peuvent en effet représenter un facteur aggravant, accélérateur sinon déclencheur par affaissement, fluage ou dissolution dans une zone où la pente est plus forte et les formations géologiques tectonisées, entraînant des glissements importants par effet gravitaire, conjugué aux conditions climatiques et à la présence d'argiles.

Le programme proposé par le BRGM a permis d'aborder la problématique sous un angle pluridisciplinaire en mettant en œuvre plusieurs moyens d'investigation :

- l'inventaire de l'ensemble des effondrements et affaissements connus sur la commune avec l'analyse des données de forage présentant des indices de gypse ;
- une reconnaissance géologique et structurale de terrain ;
- l'acquisition et l'interprétation de levés de géophysique au sol par différentes méthodes (sismique réflexion et tomographie de résistivité électrique) ;
- la réalisation de deux sondages carottés pour appuyer les données géophysiques ;
- des analyses géochimiques des eaux contenues dans le sous-sol.

La présence de formations gypsifères est avérée sur la commune et associée à de grands niveaux de décollement dans la série triasique qui ont probablement joués un rôle de « couche savon » pour permettre une tectonique chevauchante dans l'histoire géologique locale et régionale. À l'est de la commune, les niveaux de décollement sont localisés à la base (au mur) des calcaires du Muschelkalk moyen ( $\Phi 1$ ) et au sommet (au toit) de ces calcaires ( $\Phi 2a$ ). Ces niveaux de décollement sont généralement associés à la présence de gypse dont l'épaisseur peut varier de 0 à 30 m. Une corrélation spatiale existe entre la distribution des désordres de surface et la localisation des principaux niveaux de décollement  $\Phi$  repérés. Des plans de décollement ont également été identifiés dans le secteur du Pin de Galle, malgré l'absence visuelle d'indices de gypse en surface. Les investigations géophysiques associées aux données lithologiques des sondages, ainsi que les relevés de terrain géologiques et structuraux de surface, permettent de proposer une répartition spatiale de ces grands accidents tangentiels  $\Phi$  qui seraient plissés et recoupés par des failles normales dans le

secteur du Pin de Galle. Dans ce secteur, ce sont les niveaux de décollement  $\Phi 2b$  intra-Muschelkalk, voire  $\Phi 3$  du Keuper dans les calcaires supérieurs du Muschelkalk qui sont identifiés.

Du point de vue de la géochimie des eaux, le prélèvement réalisé au point A-PZ1, c'est-à-dire à l'intérieur du glissement, présente une composition de mélange entre un faciès d'eau hypersulfatée calcique caractéristique d'écoulements ayant traversés des niveaux gypsifères et les faciès homogènes des eaux souterraines rencontrées dans le Muschelkalk, les grès du Trias et les phyllades du socle. Il est donc probable qu'il y ait eu de la dissolution tout au moins partielle de gypse dans les séries traversées par les eaux au Pin de Galle. D'autant plus que le contexte climatique pendant cette étude était conjoncturellement défavorable à la dissolution de gypse (période de recharge hivernale déficitaire et sécheresse 2022), ce qui suggère une période peu propice à la circulation abondante d'eau et un phénomène de dissolution limité et moins marqué dans les prélèvements. Bien que le gypse n'ait pas été observé dans les sondages directs réalisés dans le glissement par les études géotechniques antérieures, la quantité de gypse est possiblement réduite, partiellement dissoute, et peut-être sous la forme de lentilles discontinues et difficiles à intercepter. Le contexte structural (nombreux plis et failles) et urbanisé rendent l'étude de prospection complexe à mener et dispendieuse car elle nécessiterait une répartition de plusieurs sondages profonds, avec une maille étroite dans un secteur en pente.

Cette étude montre que la présence de gypse plus en profondeur sous la Calanque du Pin de Galle et les habitations est donc possible. Le gypse est sensible à la dissolution, et peut provoquer des vides qui déstabilisent et affaissent localement les terrains sus-jacents s'il y a circulation d'eau dans le sol et le sous-sol comme dans le cas des infiltrations importantes en période de fortes précipitations.

Une étude complémentaire sur la cartographie de l'aléa glissement de terrain est recommandée pour prendre en considération la susceptibilité de présence de gypse dans le secteur du Pin de Galle, ainsi que la réévaluation des travaux de confortement proposés au regard de ce fait nouveau avant leur mise en œuvre, sauf à considérer qu'ils pourraient être inutiles ou suffisants en l'état.

Ainsi, nous conseillons à la Mairie de communiquer tout d'abord auprès des bureaux d'études qui ont proposé des solutions d'encrages et de confortement des habitations de réviser leur évaluation à la lumière de ces nouvelles connaissances. Nous recommandons à la mairie de s'appuyer sur la maîtrise d'ouvrage pour que les experts en géotechnique valident les solutions proposées précédemment et qu'ils déterminent si elles sont valables également en cas de présence de gypse plus en profondeur ou de faire les préconisations nécessaires.

Cette présente étude et la carte d'aléa glissement réalisée par IMS RN en 2019 devraient être portées à la connaissance du public et alimenter une révision future du plan de prévention d'exposition aux risques.

Par principe de précaution, sans avoir menée d'étude cartographique d'aléas complémentaire, une surveillance accrue par les services techniques de la commune après des fortes intempéries ou épisodes pluvieux prolongés devraient être menées systématiquement. Tous désordres constatés sur les bâtis ou les infrastructures (escaliers, murs, voies d'accès...) devront être décrits et consignés en précisant l'influence des eaux de ruissellement ou d'infiltration. Les écoulements naturels ou d'origine anthropique (générés par l'activité humaine) dans ce secteur devraient être chenalés autant que possible directement vers la mer en respectant la réglementation environnementale et en évitant les eaux stagnantes ou fuites de réseau dans le sol et le sous-sol. Ces préconisations devront inclure la gestion des eaux, afin d'éviter leur circulation/infiltration vers les niveaux sous-jacents contenant potentiellement du gypse en menant une réflexion à l'échelle de la calanque.

# Sommaire

<b>1. Contexte et Objectif.....</b>	<b>9</b>
<b>2. Inventaire des effondrements.....</b>	<b>11</b>
2.1. SOURCE DES DONNÉES .....	11
2.2. RÉSULTAT DE L'INVENTAIRE EFFONDREMENT .....	11
<b>3. Géologie.....</b>	<b>13</b>
3.1. ÉCHELLE LITHOSTRATIGRAPHIQUE DE RÉFÉRENCE .....	13
3.2. ÉTUDE STRUCTURALE .....	19
3.2.1. Étude de la faille bordière nord de la fenêtre des phyllades au niveau du Pin de Galle.....	19
3.2.2. Contact faillé au sud de la fenêtre des phyllades et les grès du Buntsandstein ..	21
3.2.3. Niveau de décollement au niveau du Pin de Galle .....	22
3.3. DESCRIPTION LITHOLOGIQUE DES SONDAGES BRGM1_SC2022 ET BRGM2_SC2022 .....	24
<b>4. Géophysique.....</b>	<b>29</b>
4.1. OBJECTIFS DE L'IMAGERIE GÉOPHYSIQUE .....	29
4.2. PRÉSENTATION DES MÉTHODES GÉOPHYSIQUES .....	30
4.2.1. Imagerie par sismique réflexion.....	30
4.2.2. Tomographie de Résistivité Électrique – TRE .....	30
4.2.3. Diagraphies différées en forage .....	31
4.3. ACQUISITIONS GÉOPHYSIQUES .....	32
4.3.1. Caractéristiques des acquisitions .....	32
4.3.2. Localisation et levé topographique des profils TRE .....	33
4.4. TRAITEMENTS DES DONNÉES TRE.....	34
4.5. RÉSULTATS .....	34
4.5.1. Coupes de résistivité électrique.....	34
4.5.2. Coupes en sismique réflexion .....	35
4.5.3. Diagraphies en forages .....	37
4.6. INTERPRÉTATION GÉOLOGIQUE DES PROFILS GÉOPHYSIQUES.....	41
4.6.1. Données lithologiques et exploitation des données de forages .....	41
4.6.2. Interprétation des profils électriques (avec recoupement du profil sismique PS4).....	43
4.6.3. Interprétation des coupes en sismique réflexion PS1, PS2, PS3 et PS5 .....	44
<b>5. Hydrogéochimie .....</b>	<b>49</b>
5.1. PRINCIPE ET OBJECTIFS DE LA RECHERCHE .....	49
5.2. DESCRIPTION DE LA MÉTHODOLOGIE EMPLOYÉE.....	50
5.3. PRÉLÈVEMENTS ET ANALYSES .....	52
5.4. INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS .....	53
5.5. CONCLUSIONS SUR LES APPORTS DE L'HYDROGÉOCHIMIE .....	55
<b>6. Discussion sur les données acquises .....</b>	<b>57</b>
6.1. CARTE GÉOLOGIQUE ET STRUCTURALE DU SECTEUR.....	57

6.2. AVIS SUR L'ORIGINE DES GLISSEMENTS/EFFONDREMENTS ET LA PRÉSENCE DE GYPSE AU PIN DE GALLE .....	59
6.3. RECOMMANDATIONS A L'ISSUE DE CETTE ÉUDE .....	60
<b>7. Bibliographie .....</b>	<b>61</b>

## Liste des figures

Figure 1 : Carte des effondrements, affaissements et indices connus. ....	12
Figure 2 : Inventaire des 15 effondrements recensés dans la BD MVT sur la commune du Pradet. ....	12
Figure 3 : Carte géologique du secteur au 1/50 000 levée en 1969. Cette carte géologique est obsolète et nécessiterait une mise à jour (par exemple le Muschelkalk est non différencié - terrains houillers non observés). Cercle rouge : calanque du Pin de Galle.....	14
Figure 4 : Échelle lithostratigraphique du Trias de basse Provence (communiqué par J.-P. Caron, version du 08/06/2013, Caron et Laville, 2016). ....	15
Figure 5 : Aspect des phyllades et des quartzites à l'affleurement. Notez la foliation verticale. ....	16
Figure 6 : Aspect d'une pélite (ou siltite) du Bundsandstein.....	16
Figure 7 : Grès à niveaux de conglomérat (photo de gauche) et grès rouge du Buntsandstein (photo de droite).....	17
Figure 8 : Cargneule : roche vacuolaire vue suivant plusieurs zoom (photo de gauche : partie ouest du Pin-de-Galle, photo de droite : glissement du Pin-de-Galle). ....	17
Figure 9 : Aspect des calcaires du Muschelkalk avec à gauche des fossiles de Rhynchonelles et à droite le développement d'un karst de dissolution. ....	18
Figure 10 : Localisation de la faille bordière nord de la fenêtre des phyllades (en vert) au niveau du Pin de Galle (cercle rouge).....	19
Figure 11 : Plan de faille strié affectant les grès du Buntsandstein avec stries sub-verticales (orientation symbolisée par des traits fins bleus) dont les marqueurs de déformation indiquent un mouvement normal. ....	20
Figure 12 : Représentation stéréographique (canevas de Wulff, hémisphère inférieure) des plans de fracturation et des stries à jeu normal qui affectent les grès du Buntsandstein.....	20
Figure 13 : Position de l'affleurement au niveau du contact faillé au sud de la fenêtre des phyllades (cercle rouge). ....	21
Figure 14 : Contact par faille au sud de la plage des Bonnettes interprété en faille normale. ....	22
Figure 15 : Interprétation géologique à l'ouest de la plage du Pin de Galle montrant des plis serrés déversés vers le Nord et l'emplacement approximatif des niveaux de décollement ayant pu jouer en « couche savon » à la faveur de la présence potentiel de gypse pour accommoder cette déformation et configuration géométrique. ....	23

Figure 16 : Carte de localisation des profils géophysiques et des deux forages de reconnaissance (fond de carte : carte géologique à l'échelle 1/50 000).....	24
Figure 17 : Description lithologique et paramètres des diagraphies du sondage carotté BRGM1. ....	25
Figure 18 : Description lithologique et paramètres des diagraphies du sondage carotté BRGM2. ....	26
Figure 19 : Niveau repère du sommet du Buntsandstein. Grès à pseudomorphose cubique de sel. Taille des cubes 5 à 10 mm. ....	27
Figure 20 : Principe de l'imagerie sismique. Après émission, une partie de l'onde sismique se propage à la surface du sol (interface air-sol), l'autre partie se propage en profondeur où des interfaces entre des terrains d'impédances mécaniques différentes vont en réfléchir une partie et en réfracter une autre. ....	30
Figure 21 : Principe de la Tomographie de Résistivité Électrique (TRE).....	31
Figure 22 : Carte de localisation des profils géophysiques, des forages de reconnaissance et des zones d'effondrement connues avant cette étude (fond de carte : SCAN IGN 1/25 000).....	33
Figure 23 : Coupes de résistivité des profils PE4 (haut) et PE3 (bas).....	35
Figure 24 : Coupe sismique du profil PS1.....	36
Figure 25 : Coupe sismique du profil PS2.....	36
Figure 26 : Coupe sismique du profil PS3.....	36
Figure 27 : Coupe sismique du profil PS4.....	37
Figure 28 : Coupe sismique du profil PS5.....	37
Figure 29 : Logs composites des diagraphies différées en forages des forages BRGM1 (ci-contre) et BRGM2 (ci-dessus). ....	39
Figure 30 : Localisation des forages avec suffisamment de données exploitables pour l'interprétation réalisée pour cette étude. ....	42
Figure 31 : Profil électrique PE4 superposé aux interprétations du profil sismique PS4 avec localisation des 2 forages carottés du BRGM.....	43
Figure 32 : Profil PS4 avec différents réflecteurs sismiques (Rx) et discontinuités supposés (d)x.....	44
Figure 33 : Profil électrique PE3. ....	44
Figure 34 : Proposition d'habillage des profils sismiques PS1 PS2, PS3 et PS5. R = Réflecteur sismique marquant, d= discontinuités marquantes. Les numéros sont indépendants et ne peuvent pas être reliés entre profils. Au vu du manque de données et de quelques incohérences avec les forages et la carte géologique, ces profils peuvent difficilement être totalement habillés par une interprétation géologique. ....	47
Figure 35 : Localisation des points de la campagne hydrochimique de 2022, placés sur fond géologique (extrait de la carte géologique 1/50 000 harmonisée de la région PACA, BRGM). La carte géologique de l'encart est disponible en annexe (source H2EA, 2018). ....	51
Figure 36 : Tableau récapitulatif des points de la campagne des prélèvements hydrogéochimiques réalisés en mai 2022 par le BRGM. ....	52

Figure 37 : Tableaux synthétiques des mesures chimiques sur les 8 points de prélèvements.....	53
Figure 38 : Diagramme de Piper des points de la campagne hydrochimique de mai 2022. ..	54
Figure 39 : Graphique $[SO_4^{2-}] = f([Ca^{2+}])$ pour l'ensemble des points prélevés, sauf A-PZ1. ..	55
Figure 40 : Proposition de cartographie géologique et structurale révisée. Les tracés sont interprétatifs et constituent une première base de travail pour de futures discussions.....	58

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques des profils de TRE.....	32
Tableau 2 : Caractéristiques des profils sismiques. ....	32
Tableau 3 : Coordonnées et profondeur des deux forages de reconnaissance. ....	33

## Liste des annexes

Annexe 1 : Photographie des carottes de sondage .....	63
Annexe 2 : Sondages géologiques exploitables .....	69
Annexe 3 : Géophysique (rapport de geo2x) .....	77
Annexe 4 : Carte géologique et coupes géologiques de H2EA, 2018 (2 planches hors rapport).....	121

# 1. Contexte et Objectif

La commune du Pradet, au lieu-dit du Pin de Galle et de la Pinède, a fait l'objet de plusieurs études sur les glissements de terrain afin de s'orienter vers une révision du Plan d'Exposition aux Risques (PER) opérationnel depuis 2011.

En effet, au niveau de la calanque du Pin de Galle, un glissement de terrain majeur qui s'est produit en 2014 a enclenché de nouvelles études en 2015 (ERG) et en 2019 (IMS RN) afin de réviser en conséquence le zonage de l'aléa. Des propositions de travaux de confortement du glissement ont également été présentées par IMS RN.

Ces études se sont basées sur un postulat d'absence d'évaporites sur le secteur du Pin de Galle, que ce soit au sein des formations géologiques, ou au droit des structures faillées.

La présence potentielle d'évaporites en profondeur n'a jamais été prise en compte, sans être clairement argumentée alors que sur la même commune, plus à l'Est, des phénomènes d'effondrements ont déjà été observés, et que ces derniers sont, au moins pour certains, en lien avec une problématique de dissolution de gypse et de désordres en surface (Rapport BRGM RP-66706-FR de 2017).

Il est important de déterminer si le gypse est susceptible d'être présent au Pin de Galle car il pourrait être à l'origine, au moins pour partie, de la genèse de glissements de terrain. Ce qui pourrait par conséquent remettre en cause la cartographie d'aléa glissements de terrain existante, ainsi que les travaux de confortement proposés.

En outre, rappelons que la commune n'a pas de cartographie d'aléa lié à la dissolution de gypse. Ce phénomène n'a donc pas été assez étudié, ou pris en compte.

Il est donc proposé au travers de cette étude d'évaluer, et de caractériser si nécessaire, la présence d'évaporites sur le secteur du « Pin de Galle » au regard du contexte de glissements de terrain et des observations de phénomènes de dissolution de gypse faites plus à l'Est du territoire communal.

Le programme pluridisciplinaire proposé par le BRGM et mis en œuvre au cours de cette étude visait les tâches suivantes :

- un inventaire de l'ensemble des effondrements et affaissements connus sur la commune ;
- une reconnaissance géologique et structurale de terrain ;
- l'acquisition et l'interprétation de levés de géophysique au sol par différentes méthodes (sismique réflexion et tomographie de résistivité électrique) ;
- la réalisation de deux sondages carottés pour appuyer l'interprétation des données géophysiques ;
- des analyses géochimiques des eaux souterraines circulant dans le secteur.

L'étude est élargie à l'ensemble de la commune, et n'est pas seulement focalisée sur le secteur du Pin de Galle. En effet, il est nécessaire de mieux comprendre la formation des effondrements localisés sur le territoire de la commune et situés dans sa partie orientale.

Il est en effet possible qu'il existe un lien entre ces objets et les phénomènes qui affectent la plage du Pin de Galle. L'objectif est d'établir les relations possibles ou non entre les formations géologiques observées au Pin de Galle et celles du secteur « Est » de la commune où du gypse a déjà été observés en lien avec certains désordres (fontis, affaissements). En outre, la prise de recul à l'échelle communale est nécessaire afin d'appréhender le contexte géologique et structural des mouvements de terrain dans leur ensemble et reconstituer les indicateurs géodynamiques.

La synthèse des données et de la connaissance acquise grâce à ces différentes approches permettra de se prononcer sur la nécessité d'engager une démarche de définition et de révision de la cartographie de l'aléa lié à la présence de gypse.

## 2. Inventaire des effondrements

### 2.1. SOURCE DES DONNÉES

Les documents et données qui serviront à préparer la synthèse cartographique sont :

- les observations issues de la mission de terrain effectuée durant cette étude ;
- la base de données nationale des mouvements de terrain (BD MVT) ;
- un retraitement des données Lidar (MNT) afin de correctement positionner les indices morphologiques des glissements de terrain ;
- le rapport BRGM 2017 (RP-66706-FR) ;
- les rapports d'IMS RN et de A2GE :
  1. Étude géologique, hydrogéologique et géotechnique des désordres dans le secteur du Pin de Galle et de la Pinède, le Pradet (83). Volet Géotechnique. Document provisoire-deuxième émission. 2016-Juillet 2019, IMS RN,
  2. Diagnostique géotechnique. Confortement du glissement du Pin de Galle, Mission de diagnostique G5. Affaire 2016/N1/83/1195 – version provisoire, première émission 14/08/2019, 27 pages plus annexes, IMS RN,
  3. Étude géologique, hydrogéologique et géotechnique des désordres dans le secteur du Pin de Galle et de la Pinède, le Pradet (83). Volet géologique et hydrogéologique, Décembre 2018, H2EA.

Les travaux menés par cette étude seront uniquement portés sur les effondrements et les affaissements. Les mouvements de terrain comme les chutes de pierres et les glissements de terrain ne sont pas pris en compte.

L'analyse des données Lidar, a montré que ces dernières sont de trop basse résolution pour pouvoir être exploitées.

### 2.2. RÉSULTAT DE L'INVENTAIRE EFFONDREMENT

La carte de la Figure 1 répertorie l'ensemble des effondrements, des affaissements, ainsi que les indices suspectés en photos aériennes.

Le terrain a permis de répertorier deux nouveaux affaissements au niveau du chemin de Saint-Avy. Le diamètre de ces affaissements n'excède pas 2 m. Ils sont régulièrement remblayés chaque année par les habitants qui amènent de la terre à l'aide d'une brouette.

La base BD MVT recense 15 effondrements (Figure 2). Les dates de formation de ces mouvements de terrain s'étalent de 1984 à 2016. Les diamètres reconnus sont de 2 m au maximum.

Les études de A2GE/IMS RN recensent également un affaissement survenu en 1976 (Source de la donnée : Rousset) au niveau de la calanque de la Pinède. D'après la carte géologique, cet affaissement est situé dans les phyllades du socle.

Au total, dix-huit (18) effondrements ont ainsi été répertoriés sur l'emprise communale.

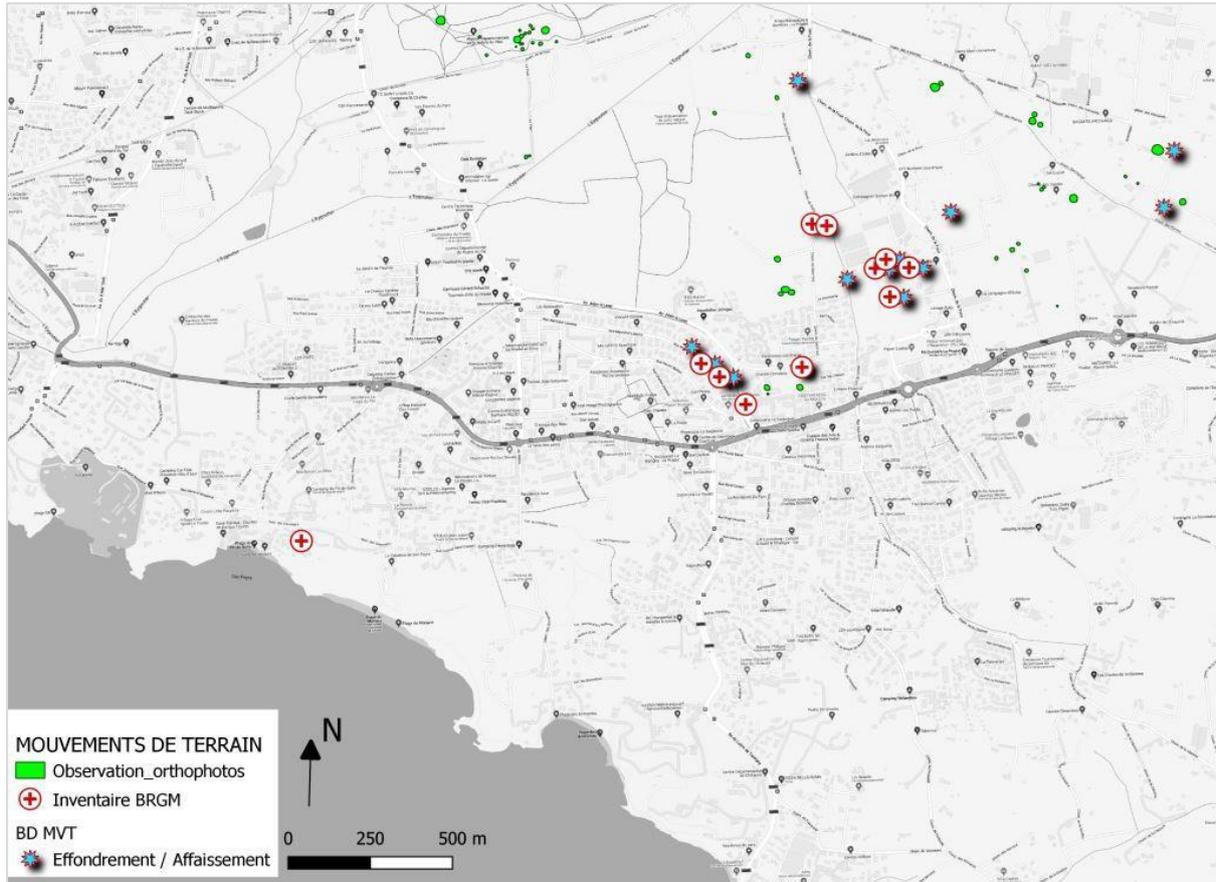


Figure 1 : Carte des effondrements, affaissements et indices connus.

idMvt	xsaisi	ysaisi	epsg	dateDebut	lieu_dit	libelleDat	prec_xy
12100335	946319.3000000...	6227944.0000000...	2154	01/01/2008	Rue Emmanuel Chabrier	DÃ©cennie	2
12100329	946536.2500000...	6227977.5000000...	2154	01/01/2016	Rue Marcel Vandelli	AnnÃ©e	1
12100334	946263.4399999...	6227985.0000000...	2154	01/01/2008	Rue Maurice Ravel	DÃ©cennie	2
12100333	946838.5600000...	6228190.0000000...	2154	01/01/2006	Plan du Pradet	Inconnue	2
12100330	946793.5000000...	6228277.5000000...	2154	01/01/2006	Plan du Pradet	Inconnue	2
12100331	946826.4000000...	6228305.0000000...	2154	01/01/2006	Plan du Pradet	Inconnue	2
12100332	946896.9000000...	6228279.5000000...	2154	01/01/2006	Plan du Pradet	Inconnue	2
68300354	901960.0000000...	1797100.0000000...	27572	01/01/1990	Sud de la station de pompage	AnnÃ©e	4
68300351	900840.0000000...	1797480.0000000...	27572	01/01/1987	La Grenouille	AnnÃ©e	4
68300352	901310.0000000...	1797080.0000000...	27572	01/11/1984	La Foux	Mois	4
68300353	901990.0000000...	1797275.0000000...	27572	01/11/1999	Station de pompage	Mois	4
68300436	900860.4399999...	1796578.5000000...	27572	01/04/2012	Rue Marcel Vandelli	Mois	1
68300451	900621.5625000...	1796563.7500000...	27572	01/01/2010	Rue Emmanuel Chabrier, voirie communale	AnnÃ©e	2
68300452	900522.5625000...	1796664.5000000...	27572	01/01/2010	Rue du MarÃ©chal Lyautey, chemin privÃ©	AnnÃ©e	2
68300453	900995.3750000...	1796872.8750000...	27572	01/01/1997	Quartier la grenouille	AnnÃ©e	2

Figure 2 : Inventaire des 15 effondrements recensés dans la BD MVT sur la commune du Pradet.

## 3. Géologie

### 3.1. ÉCHELLE LITHOSTRATIGRAPHIQUE DE RÉFÉRENCE

Pour cette étude nous utiliserons le log de référence de Jean-Paul CARON du Trias de basse Provence (Figure 4). L'analyse de cette échelle lithostratigraphique montre la présence de gypse et d'argiles dans plusieurs horizons géologiques.

Sur le terrain, lorsqu'il a été possible de faire des observations sur affleurements, la distinction entre les Muschelkalk moyen azoïque (sans vie animale) et le Muschelkalk supérieur riche en fossiles a été notée. Alors que sur la carte géologique à l'échelle 1/50 000 publiée, cette distinction n'est pas effectuée (Figure 3).

Le gypse et les argiles constituent des roches peu compétentes, représentant des zones de faiblesses au sein desquelles se localisent les déformations. Les déformations enregistrées lors de la phase pyrénéenne ont permis la genèse de structures plissées et faillées avec des structures est-ouest à vergence nord. Les horizons peu compétents correspondent à des niveaux de décollements potentiels, au nombre de 4. Les niveaux de décollements sont situés de bas en haut (des âges des formations géologiques plus anciens au plus récents) :

- le niveau de décollement de base :  $\Phi 1$ , situé dans le Muschelkalk inférieur et/ou au sommet du Buntsandstein (au toit de la formation) ;
- le niveau de décollement  $\Phi 2a$ , à la base du Muschelkalk moyen ;
- le niveau de décollement  $\Phi 2b$ , au sommet du Muschelkalk moyen ou à la base du Muschelkalk supérieur ;
- le niveau de décollement  $\Phi 3$  au sein des formations du Keuper supérieur.

Au cours de la déformation, les matériaux de faible compétence vont fluer pour migrer le long des zones de déformations. Les argiles et le gypse vont parfois s'accumuler en de fortes épaisseurs à certains endroits ou au contraire, être totalement expulsés vers d'autres secteurs sous la contrainte tectonique, de sorte que l'épaisseur des argiles et du gypse varient fortement (de 0 m à plus de 30 mètres de puissance pour le gypse notamment).

Cette échelle lithostratigraphique de référence a été utilisée pour caractériser et décrire les terrains identifiés et traversés par les deux sondages carottés réalisés par le BRGM lors de cette étude (cf. description 2 forages BRGM1\_SC2022 et BRGM2\_SC2022 dans la partie 3.3 du rapport).

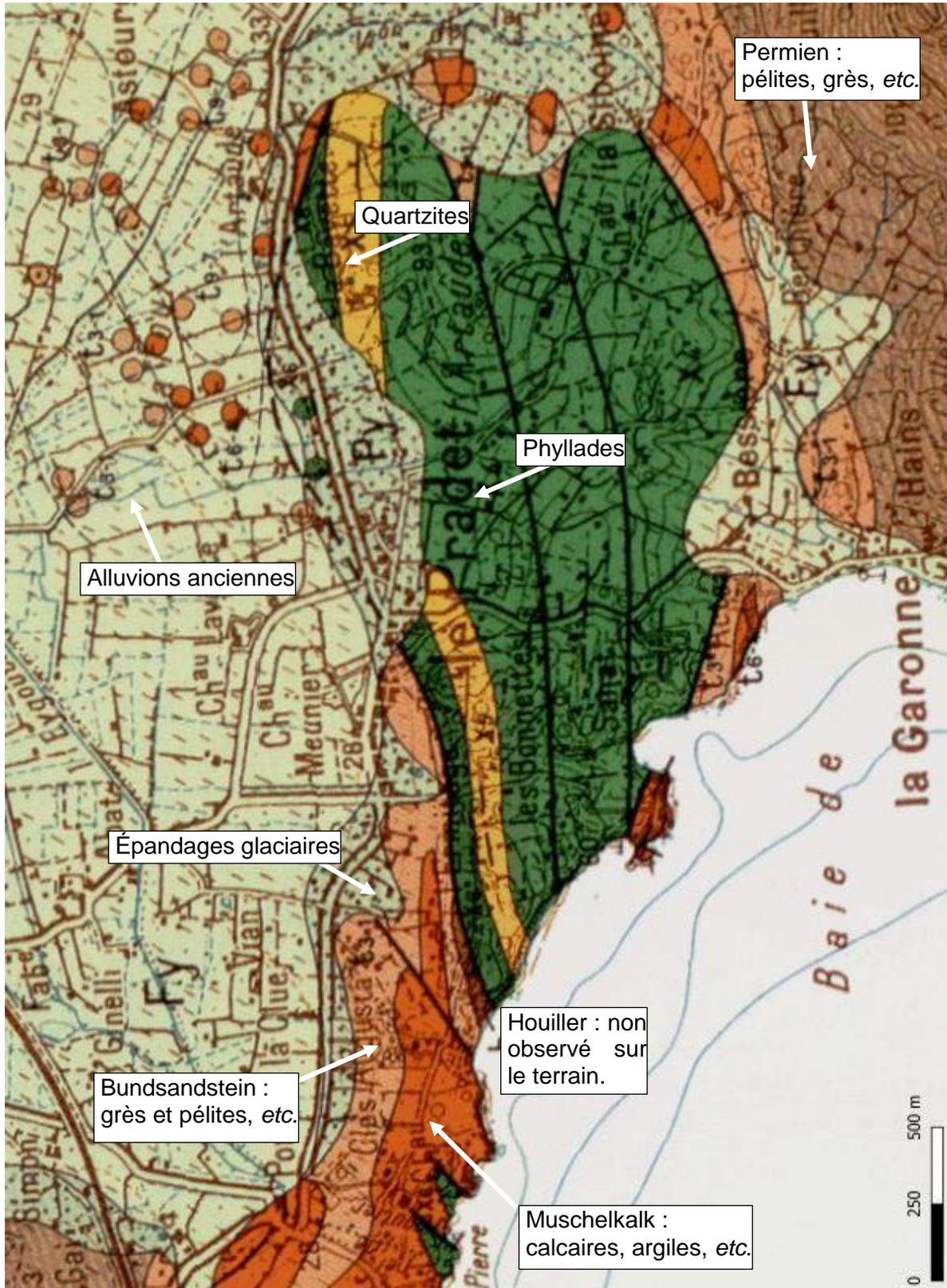


Figure 3 : Carte géologique du secteur au 1/50 000 levée en 1969. Cette carte géologique est obsolète et nécessiterait une mise à jour (par exemple le Muschelkalk est non différencié - terrains houillers non observés). Cercle rouge : calanque du Pin de Galle.

Epaisseur	Lithologie	Pétrographie	Notation	Φ	Etage	Description
Au moins 50 m		D	t1-2		Hettangien-Sinemurien	Dolomie claire et cloisonnée avec intercalations de marnes vertes
5 à 10 m		C	t7b		Rhétien supérieur	Calcaire beige à grain fin
45 à 50 m		C M	t7a		Rhétien inférieur	Alternances de marnes vertes et de calcaire ocre-jaune  Conglomérat fossilifère à <i>Avicula contorta</i>
Quelques mètres à 30 m et plus		M G	t5-6	→	Keuper supérieur	Argiles rouges à quartz bipyramidés et gypse <b>Φ 3 = niveau de décollement</b> Marnes cloisonnées et argiles blanches
15 à 20 m		D S	t4 IV	→	Keuper inférieur	Cargneules et <u>stuccifications</u> Dolomies et calcaire dolomitique
5 à 18 m		C β	III t3c II		Muschelkalk supérieur	Calcaire bicolore à <i>Myophoria Goldfussi</i> et <i>Dentalium</i> Calcaire marneux à <i>Cenoteris vulgaris</i> , <i>Ceratites nodosus</i> , <i>Encrinurus</i> Calcaire à Dasycladacées et <u>intercalations basaltiques</u> (Rougiers, Blanche -225 MA)
7 à 18 m		D β	I			Dolomie, calcaire dolomitique et cargneules
0 à 30 m		β				<u>Intercalations basaltiques</u> (Méounes, Tourves, Saint-Cyr sur mer, Bandol)
0 à 10 m		M G		→		Calcaire marneux et marnes blanches Amas gypseux <b>Φ 2b = niveau de décollement</b>
10 m		C	t3b		Muschelkalk moyen	Calcaire gris fumée et calcaire dolomitique gris clair ?
10 m		M L	t3b			Marne à intercalations <u>ligniteuses</u> ponctuelles ?
0 à 25 m		M G		→		Marne, argile et gypse en amas lenticulaires <b>Φ 2a = niveau de décollement</b>
3 à 5 m		C				Calcaire <u>argileux</u> finement lité
5 à 10 m		D				Dolomie, calcaire et cargneule
50 m		C	t3a2			Calcaire gris fumée en bancs massifs avec intercalations de petits bancs bien stratifiés
5 à 10 m		D				Calcaire, calcaire <u>dolomitique</u> et cargneule
0 à 30 m		M G	t3a1	→		Marnes argiles et gypse en amas lenticulaires <b>Φ 1 = niveau de décollement</b>
5 m						<u>Gres</u> argileux à pseudomorphoses cubiques de cristaux de sel
Sondage BRGM1 60 à 80 m		S A	t2		Buntsandstein	<u>Gres</u> dolomitiques clairs à ripples marks  alternant avec des <u>psammites</u> et des <u>gres</u> argileux rouges à plans de sédimentation obliques
Sondage BRGM2						<u>Gres</u> grossiers et <u>gres</u> argilo-micacés avec nodules et plans de sédimentation obliques
1 à 10 m			t1			Conglomérat de base et <u>gres</u> quartzeux
> 1000 m			r		Permien terminal	<u>Pelites</u> rouges

Figure 4 : Échelle lithostratigraphique du Trias de basse Provence (communiqué par J.-P. Caron, version du 08/06/2013, Caron et Laville, 2016).

Les principales lithologies rencontrées sont :

- **les phyllades et quartzites d'âge anté-Carbonifère** (Figure 5). Ce sont des roches métamorphiques grises à noires qui se délitent en minces feuillets. Les quartzites ne sont qu'un passage beaucoup plus riche en quartz et donc d'aspect plus clair. Elles ont été fortement déformées lors de l'orogénèse varisque et présentent des structures foliées généralement sub-verticales ;



Figure 5 : Aspect des phyllades et des quartzites à l'affleurement. Notez la foliation verticale.

- **les pélites du Permien et du Buntsandstein** (Figure 6). Ces roches sont principalement présentes dans le Permien mais peuvent être présentes aussi dans les grès du Buntsandstein. Elles sont principalement rouges mais peuvent présenter parfois deux couleurs : rougeâtre et verdâtre. Ce sont des siltites (silt consolidés) ;



Figure 6 : Aspect d'une pélite (ou siltite) du Buntsandstein.

- **les grès du Buntsandstein.** Ils constituent la base du Trias. C'est une roche composée de grès de couleur rouge constitué de grains de quartz. À La base des niveaux conglomératiques sont présents sur une épaisseur de 1 à 10 m (gros galets centimétriques de quartz). Ce niveau est visible à l'affleurement au niveau du parking du Pin de Galle (Figure 7) ;



Figure 7 : Grès à niveaux de conglomérat (photo de gauche) et grès rouge du Buntsandstein (photo de droite).

- **la cargneule** (Figure 8). Ce sont des roches carbonatées de teinte jaune à rouille, d'aspect vacuolaire (caverneuse) due à la dissolution de la dolomie sous l'action d'eaux sulfatées. Un réseau de fractures, drains originels des eaux sulfatées est généralement associé. Ces roches sont toujours associées à des niveaux de déformations intenses, elles soulignent les failles et niveaux de décollements.



Figure 8 : Cargneule : roche vacuolaire vue suivant plusieurs zoom (photo de gauche : partie ouest du Pin-de-Galle, photo de droite : glissement du Pin-de-Galle).

▪ **Les calcaires, dolomies, marnes et gypse du Muschelkalk**

Les calcaires sont des roches de couleur grise (Figure 9). Elles sont carbonatées et peuvent par conséquent présenter un aspect karstifié à l'affleurement (cavités de dissolution). Les calcaires du Muschelkalk supérieur (t3c) sont fossilifères contrairement aux calcaires du Muschelkalk inférieur (t3ab). Les épaisseurs peuvent atteindre la cinquantaine de mètres.

Plusieurs niveaux de marnes sont présents au sein de l'unité du Muschelkalk. Elles sont plus ou moins riches en argiles et contiennent quasi systématiquement du gypse.

Au sein de la série, 4 niveaux sont identifiés :

- le premier niveau se situe à la base de l'unité. Il est formé des marnes à gypse notées t3a1 ;
- au toit de ce niveau sont présents des calcaires gris fumés massifs à intercalations de petits bancs bien stratifiés non fossilifères notés t3a2 ;
- le Muschelkalk moyen (t3b) est marqué par de fortes variations lithologiques (calcaires, marnes, argiles et niveaux de gypses de faible épaisseur) et un niveau de calcaire massif gris clair parfois dolomitique formant le cœur de la série ;
- la partie supérieure du Muschelkalk (t3c) est constituée de calcaires marneux et de calcaires massifs riches en restes fossilifères, de débris de faune marine et de bioturbidites (des traces de brassage ou fouissement biologique du sédiment par des organismes).

Les niveaux marneux et plus particulièrement ceux contenant du gypse constituent des niveaux de décollements préférentiels. Ils sont situés à la base du Muschelkalk dans le t3a1 ( $\Phi$ 1), ainsi que de part et d'autre du niveau de calcaire massif dans le t3b ( $\Phi$ 2 et  $\Phi$ 3).



Figure 9 : Aspect des calcaires du Muschelkalk avec à gauche des fossiles de *Rhynchonelles* et à droite le développement d'un karst de dissolution.

## 3.2. ÉTUDE STRUCTURALE

### 3.2.1. Étude de la faille bordière nord de la fenêtre des phyllades au niveau du Pin de Galle.

Cette faille se rattache au linéament principal qui sépare les phyllades au sud (en vert) et les grès triasiques au nord (en marron clair sur la Figure 10). Les terrains houillers apparents sur la carte géologique de 1969 n'ont pas été observés sur le terrain. Du point de vue cartographique, elle est interprétée comme une faille chevauchante à vergence nord verticalisée *a posteriori*.

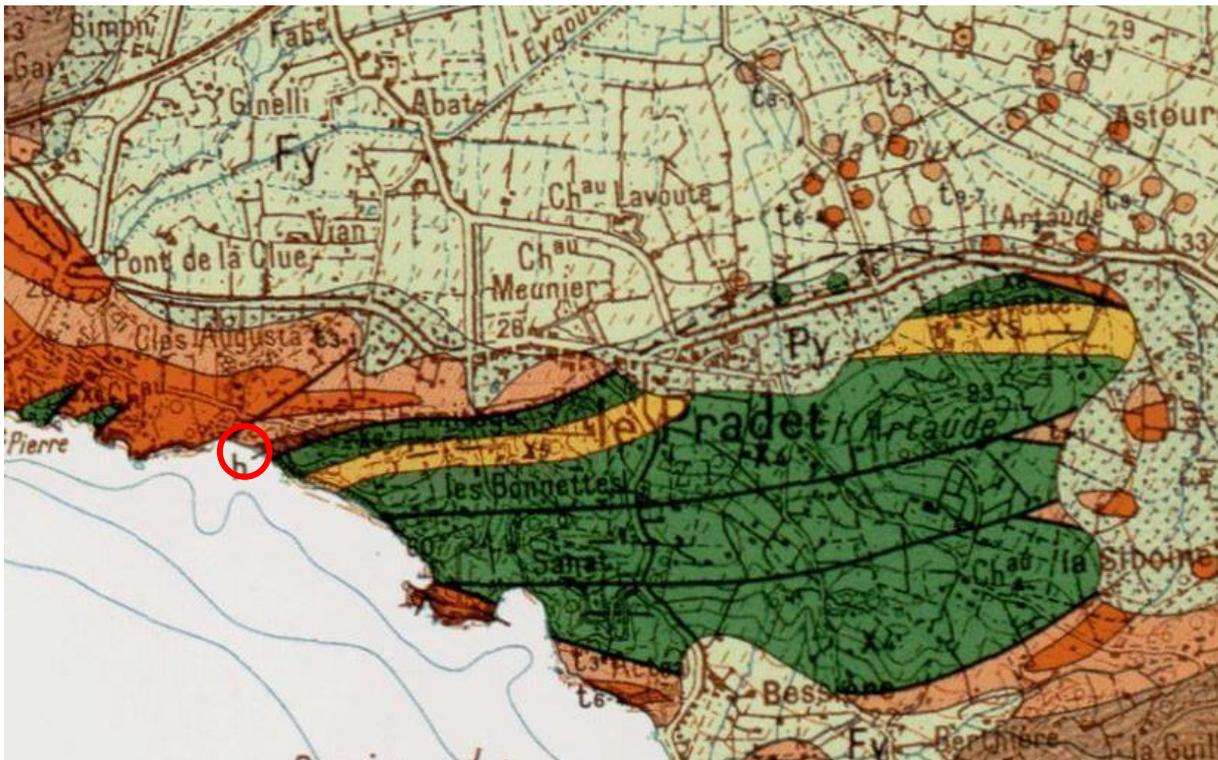


Figure 10 : Localisation de la faille bordière nord de la fenêtre des phyllades (en vert) au niveau du Pin de Galle (cercle rouge).

De manière plus précise, cette faille délimite au nord les grès du Buntsandstein et au sud les terrains argileux impliqués dans le glissement du Pin de Galle. L'analyse des plans de fracturation et des stries apparentes sur la surface (Figure 11) au niveau du Pin-de-Galle montre qu'elle joue avec un jeu principalement normal (Figure 12) avec le compartiment sud qui s'effondre ( $\sigma_1 = 61/N123$ ). Cette faille subverticale est orientée N80.



Figure 11 : Plan de faille strié affectant les grès du Buntsandstein avec stries sub-verticales (orientation symbolisée par des traits fins bleus) dont les marqueurs de déformation indiquent un mouvement normal.

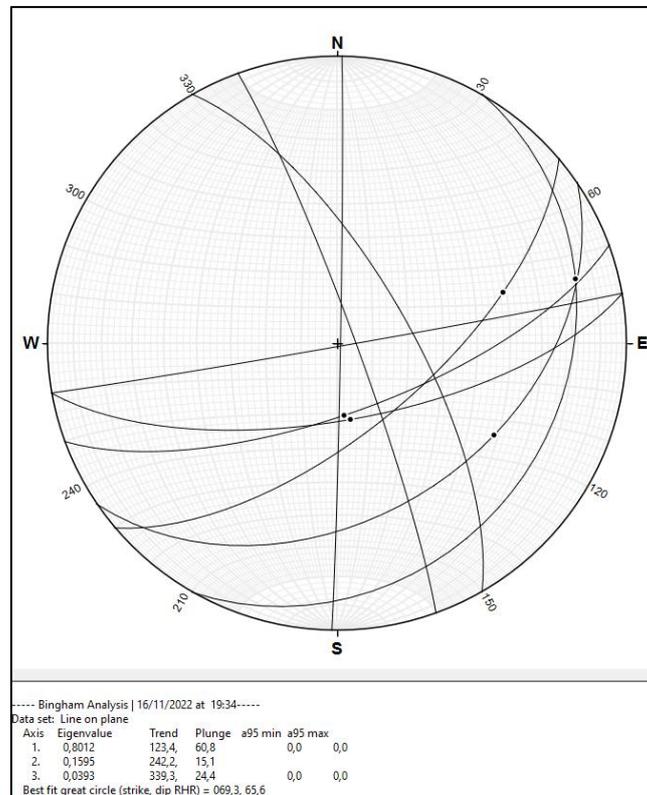


Figure 12 : Représentation stéréographique (canevas de Wulff, hémisphère inférieure) des plans de fracturation et des stries à jeu normal qui affectent les grès du Buntsandstein.

### 3.2.2. Contact faillé au sud de la fenêtre des phyllades et les grès du Buntsandstein

Au sud de la plage des Bonnettes, il est possible d'observer un contact par faille orienté N110 entre les phyllades du socle au sud et les grès du Trias inférieur au nord (Figure 14). Le contact est fortement verticalisé et pente vers le nord d'environ 70°. La faille semble parallèle à la stratification mais lorsque l'on regarde dans le détail, elle rabote avec un léger biseau les couches de grès du Trias qui sont replissées suivant des plis dissymétriques à flancs courts et flancs longs qui suggèrent une faille normale. Soulignons que la carte géologique au niveau de ce secteur mérite d'évoluer (Figure 13) car les formations du Muschelkalk n'ont pas été observées le long de la traverse réalisées entre la plage de la Garonne et des Bonnettes, alors que les affleurements de grès du Buntsandstein sont constamment présents. Ce contact peut être interprété de deux manières : soit il s'agit d'un chevauchement du socle sur les grès qui a été ensuite fortement verticalisé, soit il s'agit d'une reprise du plan de chevauchement en faille normale.

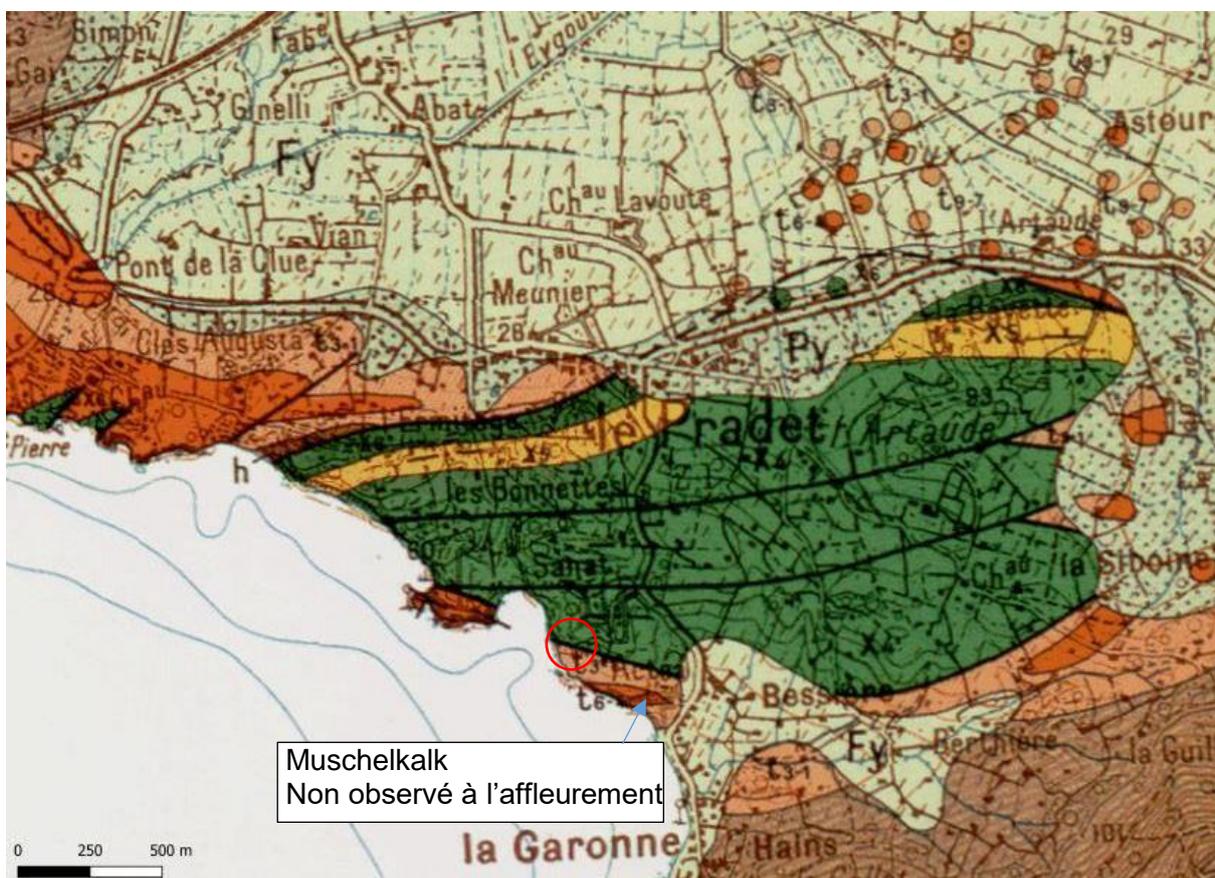


Figure 13 : Position de l'affleurement au niveau du contact faillé au sud de la fenêtre des phyllades (cercle rouge).

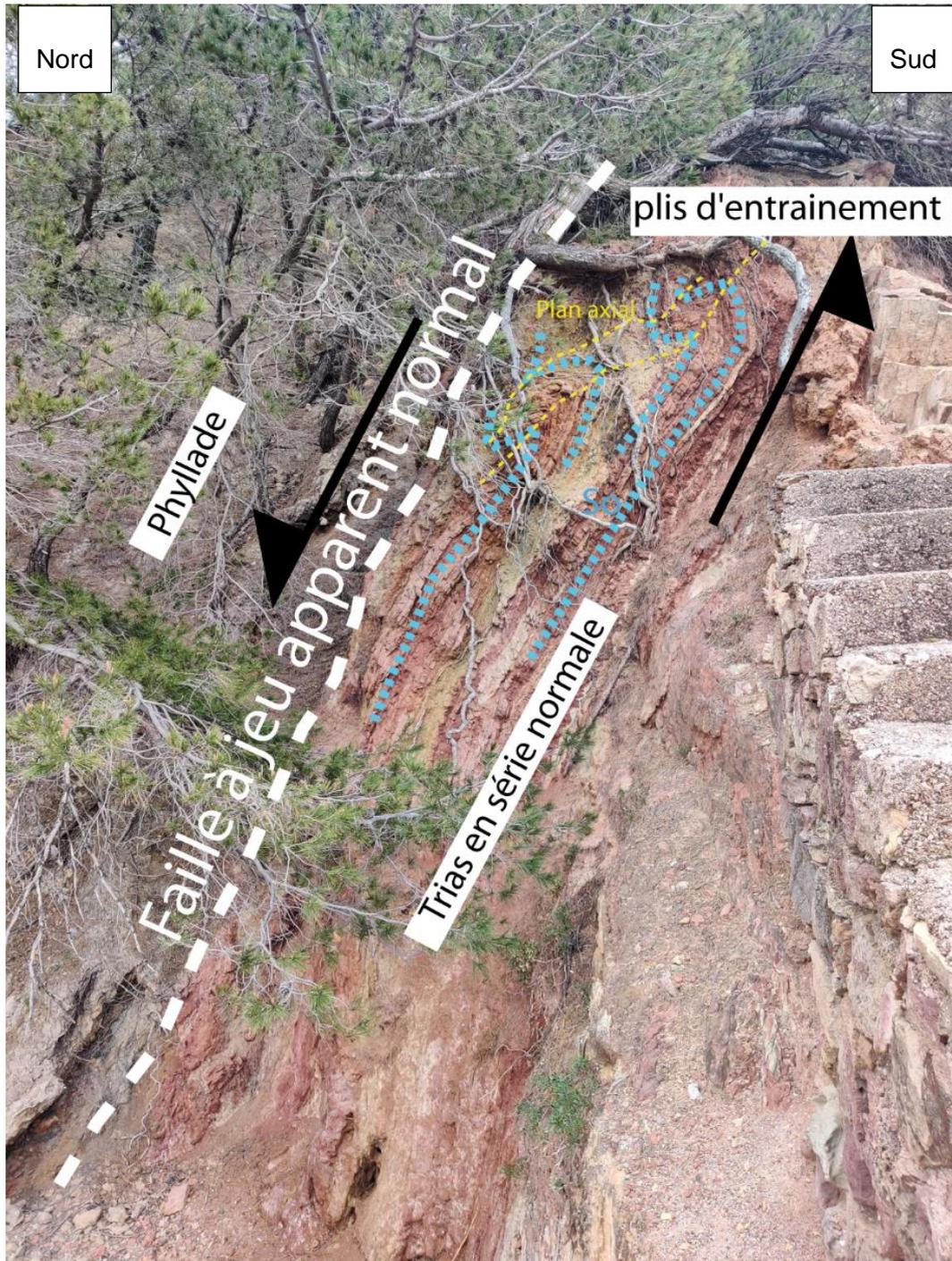


Figure 14 : Contact par faille au sud de la plage des Bonnettes interprété en faille normale.

### 3.2.3. Niveau de décollement au niveau du Pin de Galle

Les calcaires qui affleurent sur la partie ouest de la plage du Pin de Galle font partie du Muschelkalk supérieur et se présentent en série apparente inversée du côté de la mer (critère de polarité déterminé par Jean-Paul CARON, géologue expert régional ayant participé à l'édition de la notice de la carte géologique sur ce secteur et poursuivant la mise à jour des données : communication personnelle lors de sa consultation en 2022 après autorisation accordée par la commune). En outre, il est possible de voir depuis la plage une charnière d'un

anticlinal déversé avec un flanc court et un flanc long dans la partie abrupte de la falaise (Figure 15). Ce secteur mériterait davantage d'examen et de mesures structurales pour pouvoir statuer définitivement sur le contexte géodynamique et cinématique complexe, mais les investigations nécessiteraient une descente encordée en rappel le long de la falaise et une auscultation de la partie basse au niveau de la mer qu'il n'était pas possible de réaliser dans le budget de cette étude. Ces premières observations et mesures de terrain, ainsi que l'appui de l'expert, indiquent que la falaise constituée de calcaires du Muschelkalk supérieur implique la présence de niveaux de décollement, à la fois potentiellement à la base ( $\Phi 2b$ ) et au sommet ( $\Phi 3$ ) des unités calcaires plissées et déversées vers le nord.

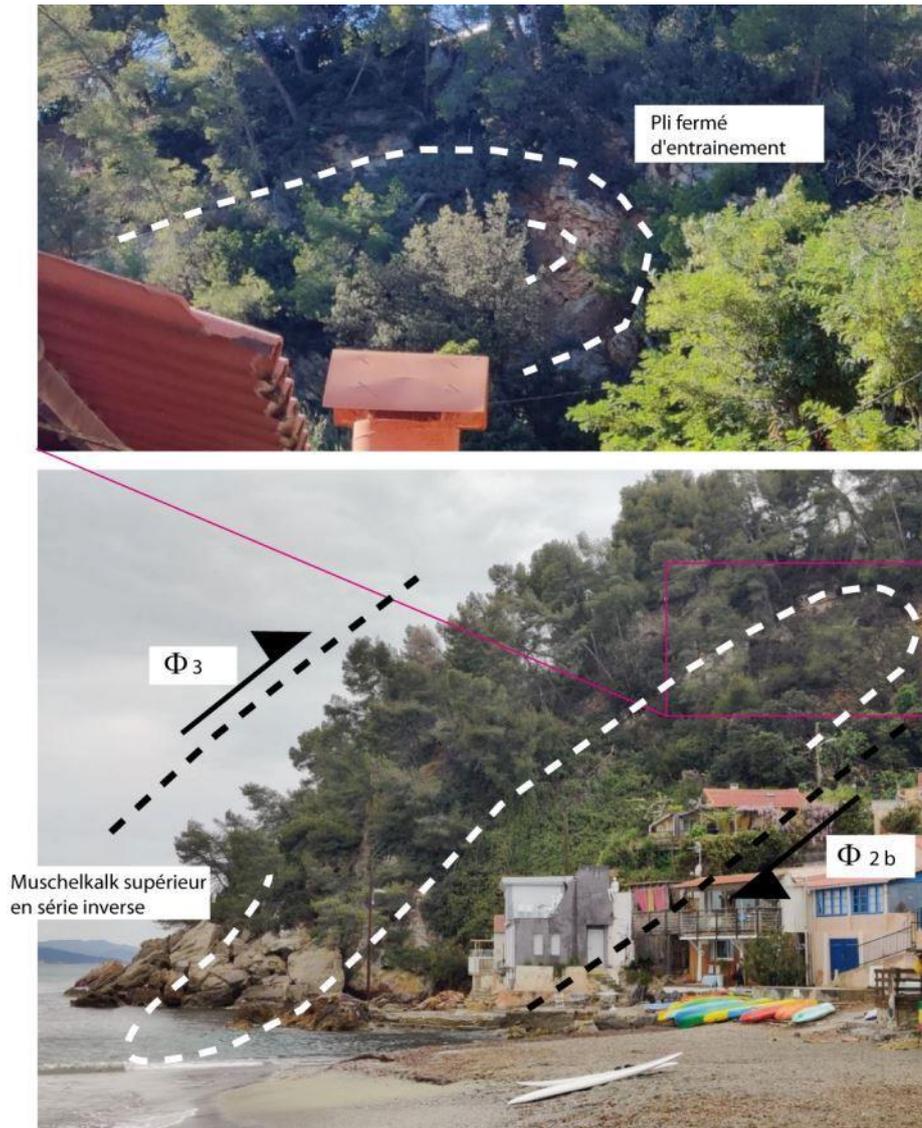


Figure 15 : Interprétation géologique à l'ouest de la plage du Pin de Galle montrant des plis serrés déversés vers le Nord et l'emplacement approximatif des niveaux de décollement ayant pu jouer en « couche savon » à la faveur de la présence potentiel de gypse pour accommoder cette déformation et configuration géométrique.

### 3.3. DESCRIPTION LITHOLOGIQUE DES SONDAGES BRGM1\_SC2022 ET BRGM2\_SC2022

Deux forages carottés verticaux ont été implantés le long des axes des profils géophysiques (Figure 16 : le long de PS4 et PE4) afin de pouvoir identifier la/les lithologies correspondantes et en caler les caractéristiques de résistivité électrique et signatures sismiques pour ainsi faciliter l'interprétation des données de géophysique au sol (chapitre 4 suivant). Les photographies des carottes sont présentées en Annexe 1.

- le forage BRGM1 a atteint une profondeur de 17,6 m (log stratigraphique et résultat de diagraphie présentés en Figure 17) ;
- le forage BRGM2 a atteint une profondeur de 16 m (log stratigraphique et résultat de diagraphie présentés en Figure 18).

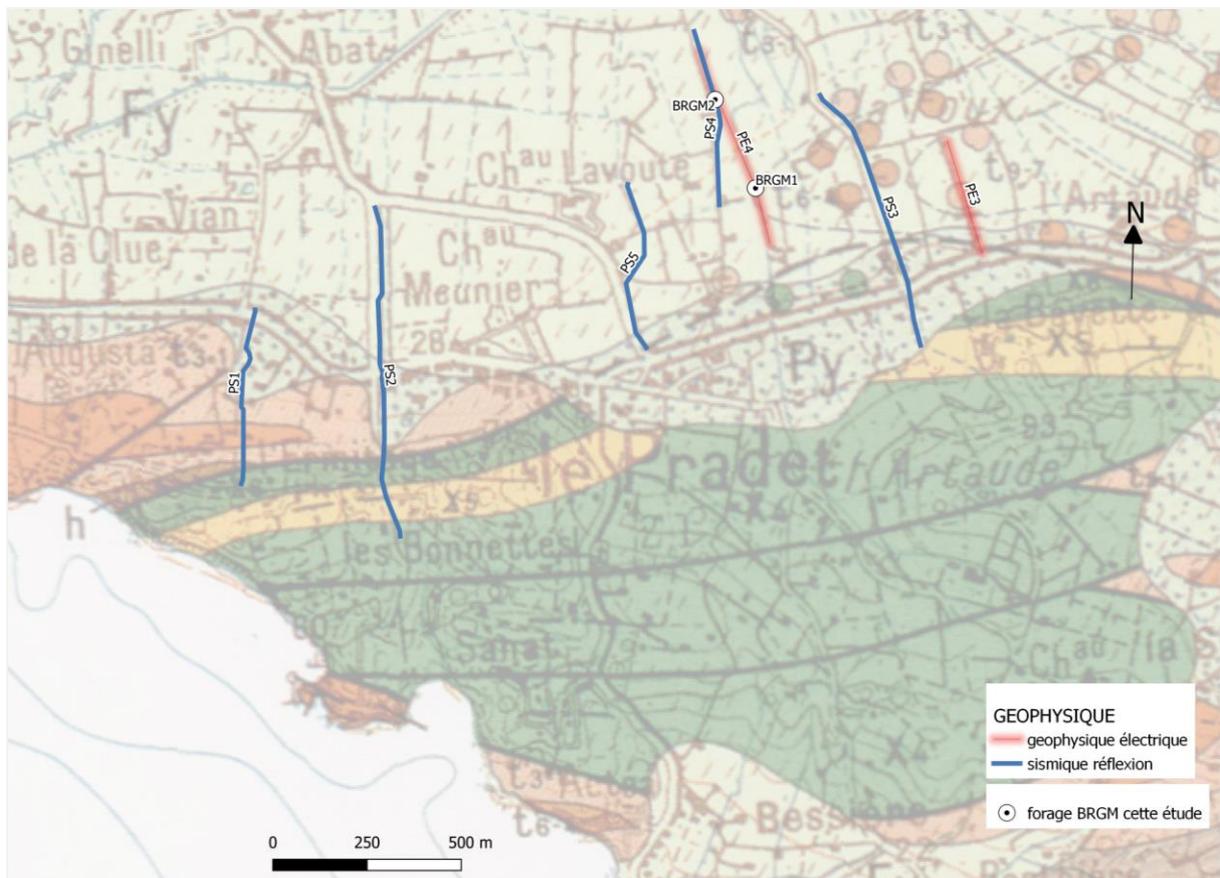


Figure 16 : Carte de localisation des profils géophysiques et des deux forages de reconnaissance (fond de carte : carte géologique à l'échelle 1/50 000).

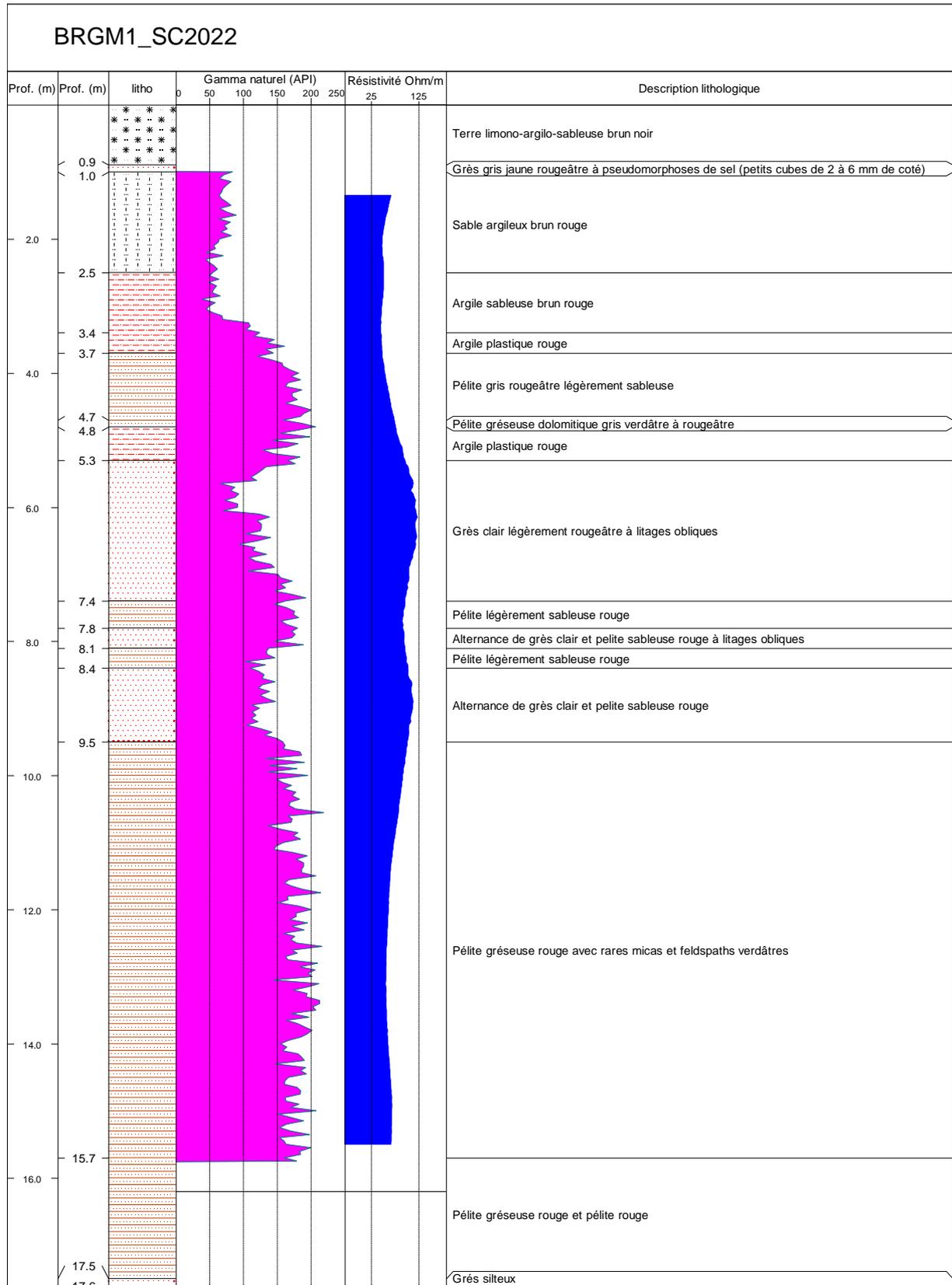


Figure 17 : Description lithologique et paramètres des diagraphies du sondage carotté BRGM1.

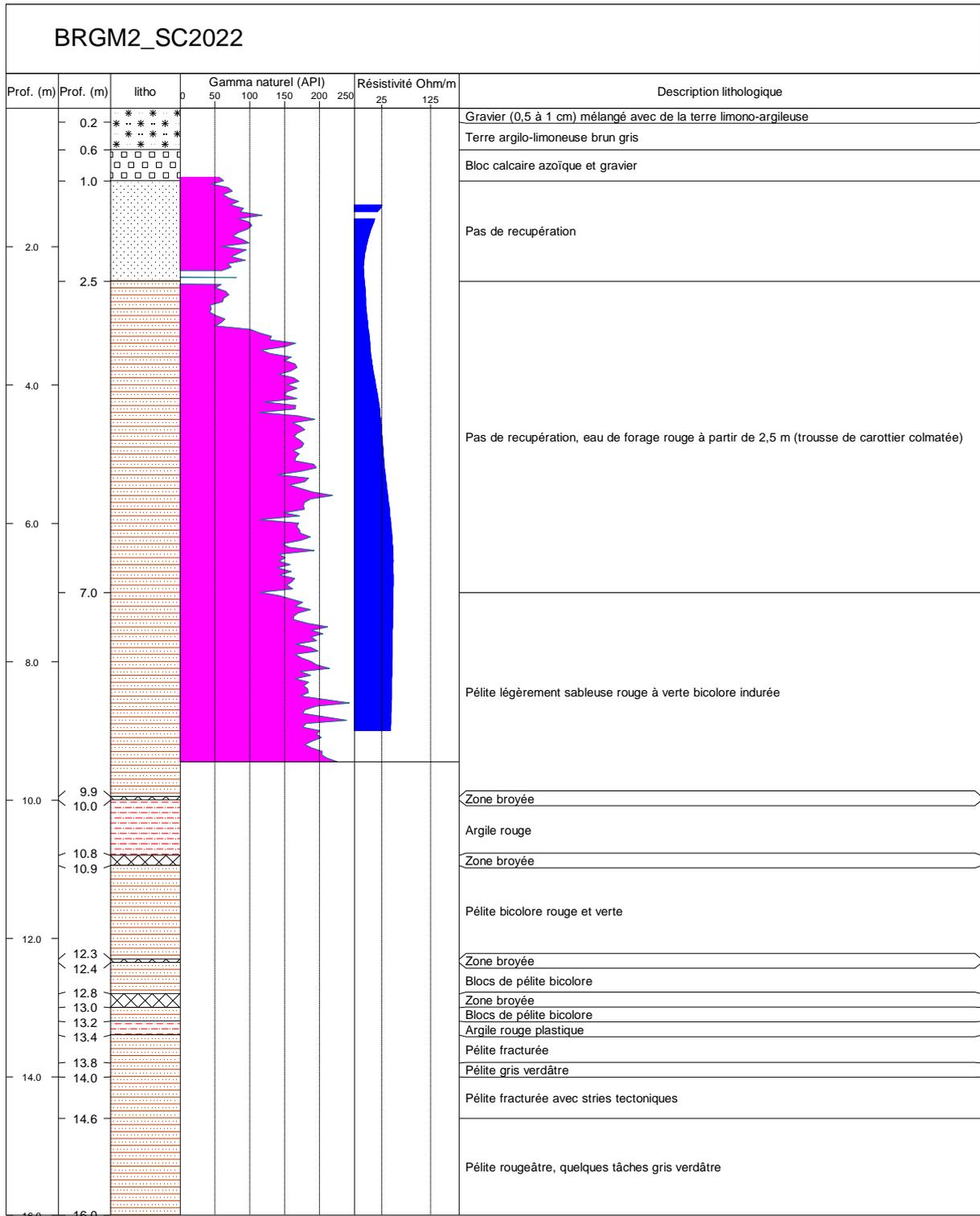


Figure 18 : Description lithologique et paramètres des diagraphies du sondage carotté BRGM2.

Les deux sondages ont recoupé les grès et pélites du Buntsandstein. Le sondage BRGM2 est implanté dans les pélites, alors que le sondage BRGM1 recoupe des faciès qui sont plus gréseux. Un niveau repère de 10 cm d'épaisseur (grès à pseudomorphose de cube de sel, (Figure 19) dans le sondage BRGM1 (à 1 m de profondeur) permet de définir précisément la position du forage au sein de la série. Si l'on se réfère à l'échelle lithostratigraphique, le niveau de décollement  $\Phi 1$  à gypse se situe au sommet des grès du Buntsandstein, juste au-dessus de ce niveau repère. Il a été également dessiné sur les profils géophysiques PS4 et PE4 interprétés. Le sondage BRGM2 qui montre principalement des pélites (plus rarement des argiles) serait également dans le Buntsandstein.



*Figure 19 : Niveau repère du sommet du Buntsandstein. Grès à pseudomorphose cubique de sel. Taille des cubes 5 à 10 mm.*



## 4. Géophysique

### 4.1. OBJECTIFS DE L'IMAGERIE GÉOPHYSIQUE

L'imagerie géophysique regroupe un ensemble de méthodes permettant de fournir une image en deux dimension (coupe 2D), voire par interpolation entre les profils une interprétation en 3D de la géométrie et structure du sous-sol grâce en fonction d'un ou plusieurs paramètres physiques tels que la densité, la résistivité électrique, la vitesse de propagation des ondes sismiques...

Dans le contexte géologique spécifique du Pradet, où des niveaux évaporitiques sont présents de manière plus ou moins continue au sein des formations du Trias provençal qui sont elles-mêmes affectées par une importante déformation tectonique, l'imagerie géophysique a pour objectifs :

- d'apporter des contraintes sur la nature et l'agencement des horizons géologiques sous la surface ;
- de localiser et de caractériser les accidents structuraux (ex. failles ou accident/discontinuité majeure) qui affectent ces horizons, dans la mesure où les contrastes de propriétés physiques le permettent.

De récentes études géophysiques menées par le BRGM dans des contextes géologiquement et géographiquement proches (ex. le Luc-en-Provence<sup>1</sup>, Bargemon<sup>2</sup>) ont montré la nécessité de coupler les méthodes géophysiques pour l'auscultation des terrains si complexes. Ainsi, trois types d'investigations géophysiques ont été proposées dans le cadre de cette étude :

- l'imagerie sismique réflexion pour l'étude du bâti géologique, la localisation et la caractérisation des accidents structuraux ;
- la Tomographie de Résistivité Électrique (TRE) pour l'étude du bâti géologique et la localisation des accidents structuraux ;
- les diagraphies géophysiques différées en forage pour calibrer les signatures géophysiques des terrains de la zone d'étude et ainsi fournir les éléments nécessaires à une interprétation géologique optimale des résultats géophysiques.

L'approche multi-méthode associant la TRE et l'imagerie sismique, appuyées par les données de deux forages de reconnaissance diagraphiés, permettent d'étudier des paramètres physiques différents et complémentaires dont l'analyse fournit des éléments indispensables à la caractérisation géométrique des structures géologiques.

---

<sup>1</sup> Portal, A., François, B., Jacob, T., 2019. Détection de cavités souterraines et caractérisation des formations gypseuses par microgravimétrie et méthode électrique dans le quartier Saint-Honorat, Le Luc en Provence (Var, 83). BRGM/RP-68614-FR, 113 p., 27 ill., tabl., 5 ann.

<sup>2</sup> Marçot N., Genevier M., Abad J., Aslan G., Beccaletto L., Bitri A., Coueffe R., De Michele M., Equilbey E., Gaudot I., Portal A., Lombard M., Ibba M., Maurice B., Wright R., 2022. Gestion du risque affaissement-effondrement lié à la dissolution de gypse - Commune de Bargemon (Var). Rapport final. BRGM/RP-71427-FR.

## 4.2. PRÉSENTATION DES MÉTHODES GÉOPHYSIQUES

### 4.2.1. Imagerie par sismique réflexion

L'imagerie sismique vise à déterminer les variations des propriétés mécaniques des terrains en profondeur, le long d'un profil d'acquisitions. Cette méthode non invasive et non destructrice, consiste à étudier les discontinuités de vitesse de propagation des ondes sismiques dans le sous-sol. Les ondes sismiques correspondent dans notre cas d'étude à des ondes acoustiques générées à la surface du sol par une petite masse située à l'arrière d'un camion et qui percute le sol de manière répétitive en crée une vibration qui se propage dans le sous-sol (Figure 20). Depuis la source, plusieurs types d'ondes se propagent et certaines ondes vont être réfléchies aux interfaces et discontinuités (contact ou changement de lithologie ou de propriétés/caractéristiques, faille majeure...). L'étude des ondes réfléchies renvoyées vers la surface et récupérées par des géophones ou récepteurs placés à intervalles réguliers le long d'un profil rectiligne, permet de mettre en évidence l'agencement des terrains géologiques le long d'un plan en 2 dimensions et d'imager les structures tectoniques et la géométrie des terrains sous-jacents traversés. Les documents obtenus rendent compte des contrastes de vitesses entre les différents objets géologiques en présence. Les profondeurs d'investigations dépendent des paramètres d'acquisition.

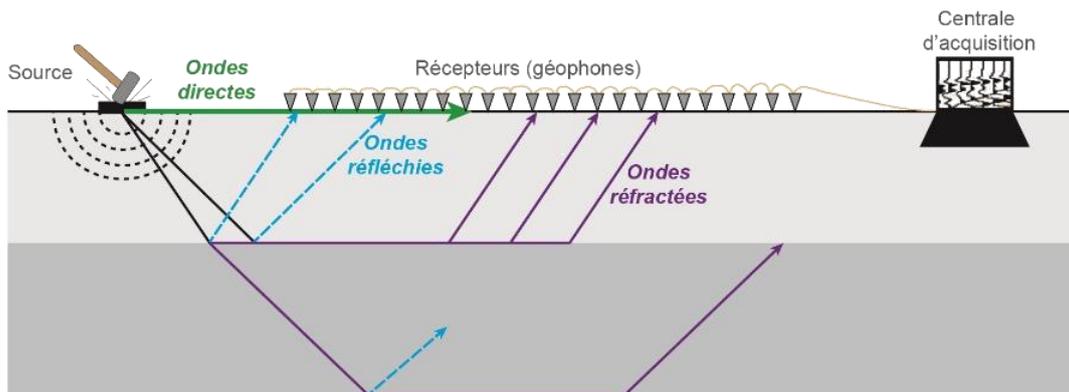


Figure 20 : Principe de l'imagerie sismique. Après émission, une partie de l'onde sismique se propage à la surface du sol (interface air-sol), l'autre partie se propage en profondeur où des interfaces entre des terrains d'impédances mécaniques différentes vont en réfléchir une partie et en réfracter une autre.

### 4.2.2. Tomographie de Résistivité Électrique – TRE

La TRE permet de déterminer la distribution de la résistivité électrique en profondeur, le long d'un profil d'acquisition (Figure 21). Cette méthode non invasive et non destructrice également, consiste à injecter un courant électrique dans le sous-sol (intensité  $I$  jusqu'à 2 A) et à mesurer la différence de potentiel ( $U$ ) alors générée (Figure 21). La résistivité  $R$  des terrains est déterminée, de manière simplifiée, grâce à la loi d'Ohm ( $R=U/I$ ). Les documents obtenus permettent d'imager le sous sol en terme de variations de résistivité/conductivité sur plusieurs dizaines de mètres de profondeur.

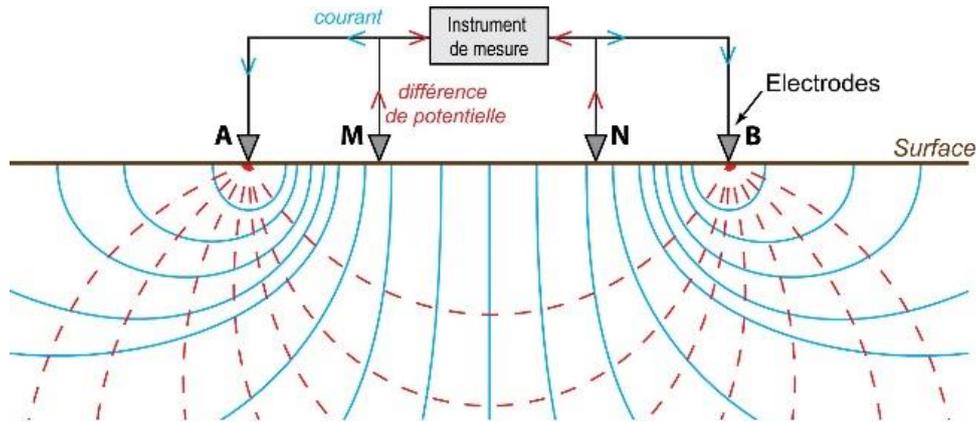


Figure 21 : Principe de la Tomographie de Résistivité Électrique (TRE).

#### 4.2.3. Diagraphies différées en forage

La réalisation des diagraphies consiste à mesurer, à l'aide de différentes sondes, les caractéristiques des roches traversées lors d'un forage. Plusieurs types de diagraphies peuvent être acquises.

La diagraphie gamma permet de mesurer la distribution verticale du rayonnement gamma naturel. Dans les terrains sédimentaires, ce signal est à associer à la présence d'argiles qui sont plus riches en potassium, un élément qui fait partie des trois radionucléides naturellement présent dans le sol. Cette méthode permet donc d'identifier les horizons argileux recoupés par le forage et ainsi de bien caler les coupes géo-électriques.

La diagraphie de résistivité électrique permet de mesurer la distribution verticale de la résistivité. Elle est un complément aux acquisitions TRE, en donnant des informations précises sur la répartition locale des résistivités du milieu en fonction de la profondeur. Elle permet ainsi de caler l'interprétation des mesures acquises en surface en levant les ambiguïtés. Les variations de résistivité fournissent une information sur la nature lithologique des terrains traversés. Des mesures de diagraphie par induction ont été réalisées et permettent d'étudier les variations de la conductivité, ensuite convertie en résistivité. La sonde de mesure est composée d'une bobine émettrice et d'une bobine réceptrice. Un courant alternatif à haute fréquence est envoyé dans la bobine émettrice. Ce courant produit un champ magnétique alternatif qui induit dans le sol environnant autour de la bobine des courants tourbillonnaires (courants de Foucault). Ces courants, à leur tour, engendrent leur propre champ magnétique qui induit un signal dans la bobine réceptrice. Si le courant émetteur est maintenu à une valeur constante, les courants de Foucault seront proportionnels à la conductivité du sol. Il en résulte que le signal reçu sera lui aussi proportionnel à la conductivité des formations traversées. La distance  $L$  entre les bobines est l'espacement. Le point de mesure est le point  $O$  à mi-distance entre les bobines. En général, l'électronique de l'appareil d'enregistrement transforme directement le signal reçu en terme de résistivité.

### 4.3. ACQUISITIONS GÉOPHYSIQUES

#### 4.3.1. Caractéristiques des acquisitions

Deux profils TRE ont été réalisés (Figure 22). Leurs caractéristiques détaillées sont présentées dans le Tableau 1. Les mesures ont été effectuées par un résistivimètre Syscal Terra (IRIS Instruments). Les acquisitions ont été réalisées suivant les protocoles suivants :

- Wenner-Schlumberger réciproque (WSR) pour sa sensibilité aux variations verticales et horizontales de résistivité et sont fort rapport signal/bruit ;
- Dipôle-Dipôle (DD) qui offre une bonne résolution des niveaux superficiels et permet de bien résoudre les variations latérales de résistivité.

De l'eau saturée en sel a été ajoutée au niveau des électrodes afin de garantir des résistances de prises inférieures à 2 kOhm.

Nom du profil	Nombre d'électrodes	Longueur	Protocole	Données retenues après filtrage*
PE3	64	315 m	DD	97,4 %
			WSR	96,8 %
PE4	96	475 m	DD	97,7 %
			WSR	99,3 %

Tableau 1 : Caractéristiques des profils de TRE.

Cinq profils sismiques ont été réalisés par GEO2X à l'aide d'une source vibrante, camion Envirovibe IVI Mark II (Tableau 2 ; distance inter-trace : 5 m ; distance inter-tir : 10 m). Les coupes sismiques temps ont été transformées en profondeur en utilisant les vitesses d'intervalles obtenues par l'analyses de vitesses (RMS).

Ligne	Géophones	Sources	Longueur
PS1	96	48	475
PS2	176	88	875
PS3	148	74	735
PS4	96	48	475
PS5	93	47	460

Tableau 2 : Caractéristiques des profils sismiques.

Pour caractériser les structures identifiées sur les acquisitions géophysiques, deux forages carottés ont été réalisés (Figure 22 et Tableau 3). Les diagraphies réalisées dans les trous de forages correspondent :

- au rayonnement gamma naturel ;
- à l'induction : l'outil utilisé est un *Dual Induction Laterolog* (ou *DIL* modèle *QL40-IND Dual Focused Induction probe*) qui comporte deux sondes, une induction profonde qui mesure la profondeur d'investigation maximale ainsi qu'une induction moyenne, qui correspond à une profondeur d'investigation moindre, plus influencée par le fluide de forage.

Forage	X (m, Lambert 93)	Y (m, Lambert 93)	Z (m)	Profondeur (m)
BRGM1	946651,49	6228209,36	27,0	17,60
BRGM2	946556,53	6228462,31	24,5	16,02

Tableau 3 : Coordonnées et profondeur des deux forages de reconnaissance.

#### 4.3.2. Localisation et levé topographique des profils TRE

La localisation et le levé topographique des profils ont été réalisés grâce à un GPS différentiel Trimble® Geo7X. Les données GPS brutes ont été post-traitées avec le logiciel GPS Pathfinder Office v.5.85 grâce aux éphémérides enregistrées à la station TLTG<sup>3</sup> du Réseau GNSS Permanent située à Toulon (à environ 12 km à l'est de la zone d'étude).

La Figure 22 présente la carte d'implantation des profils géophysiques et des deux forages BRGM1 et BRGM2.

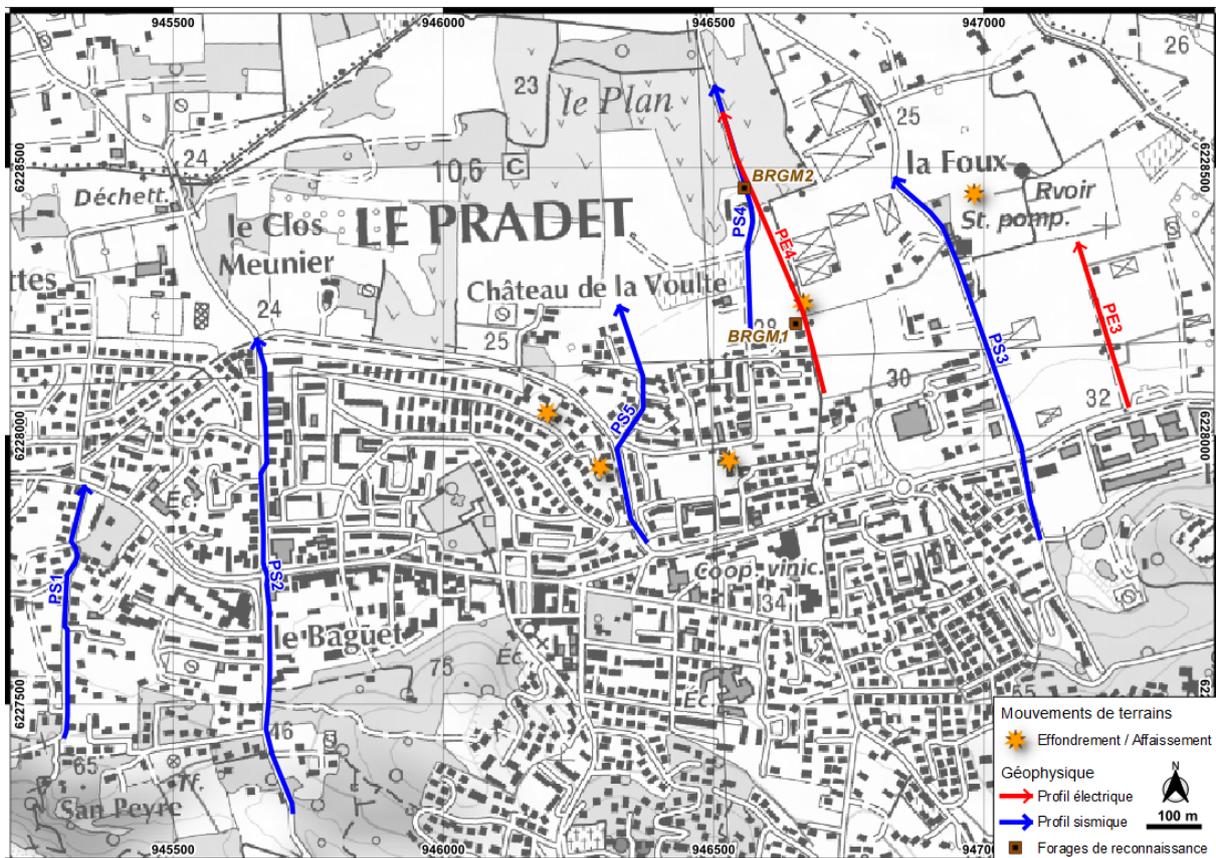


Figure 22 : Carte de localisation des profils géophysiques, des forages de reconnaissance et des zones d'effondrement connues avant cette étude (fond de carte : SCAN IGN 1/25 000).

<sup>3</sup> <https://rgp.ign.fr/STATIONS/#TLTG>

#### 4.4. TRAITEMENTS DES DONNÉES TRE

Les données brutes ont été filtrées à l'aide du logiciel PROSYS II (V03.13.06 IRIS Instrument). Sur la base des critères de seuil recommandés par l'AGAP Qualité<sup>4</sup> :

- tension minimale de réception  $V_{\min} \geq 0,5$  mV ;
- intensité minimale d'émission  $I_{\min} \geq 20$  mA ;
- écart-type sur la mesure  $Q \leq 5$  %.

Pour chaque profil, les données acquises avec chaque protocole ont été fusionnées en un jeu de données unique afin de tirer avantage des deux dispositifs utilisés. L'inversion des données a ensuite été réalisée avec le logiciel RES2DINV (v.4.10.20) en tenant compte de la topographie le long des profils.

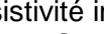
#### 4.5. RÉSULTATS

##### 4.5.1. Coupes de résistivité électrique

Les coupes de résistivités sont présentées en Figure 23. Elles sont représentées avec la même échelle de couleur et sont orientées Sud-Nord. L'échelle verticale est 2 fois supérieure à l'échelle horizontale.

La gamme des résistivités s'étend de 5 à 1000 ohm.m. Les deux coupes sont très hétérogènes.

Le profil PE4 se divise en deux parties, séparées par une discontinuité verticale marquée à l'abscisse 225 m :

- au Sud, entre 0 m et 225 m d'abscisse, les terrains sont globalement résistants (R1, entre 60 et 200 ohm.m, ) , avec localement des zones plus conductrices (R1', entre 25 et 60 ohm.m,  ) ;
- au Nord, entre 225 m et 550 m d'abscisse, les terrains sont globalement conducteurs (C1, entre 15 et 30 ohm.m, ). On observe un substratum résistant (R3, entre 60 et 200 ohm.m, ) , observé en pied de coupe entre 300 et 400 d'abscisse et qui remonte progressivement vers le Nord (il est sub-affleurant entre 500 et 525 m d'abscisse). Un horizon de résistivité intermédiaire (R2, entre 35 et 90 ohm.m, ) est identifié au toit du conducteur C1.

Enfin les terrains superficiels sont globalement conducteurs entre 150 et 550 m d'abscisse (C0, entre 15 et 30 ohm.m, ). L'épaisseur de ces terrains augmentent vers le N.

---

<sup>4</sup> AGAP Qualité : code de bonne pratique des méthodes de géophysique appliquée (<https://www.agapqualite.org/>).

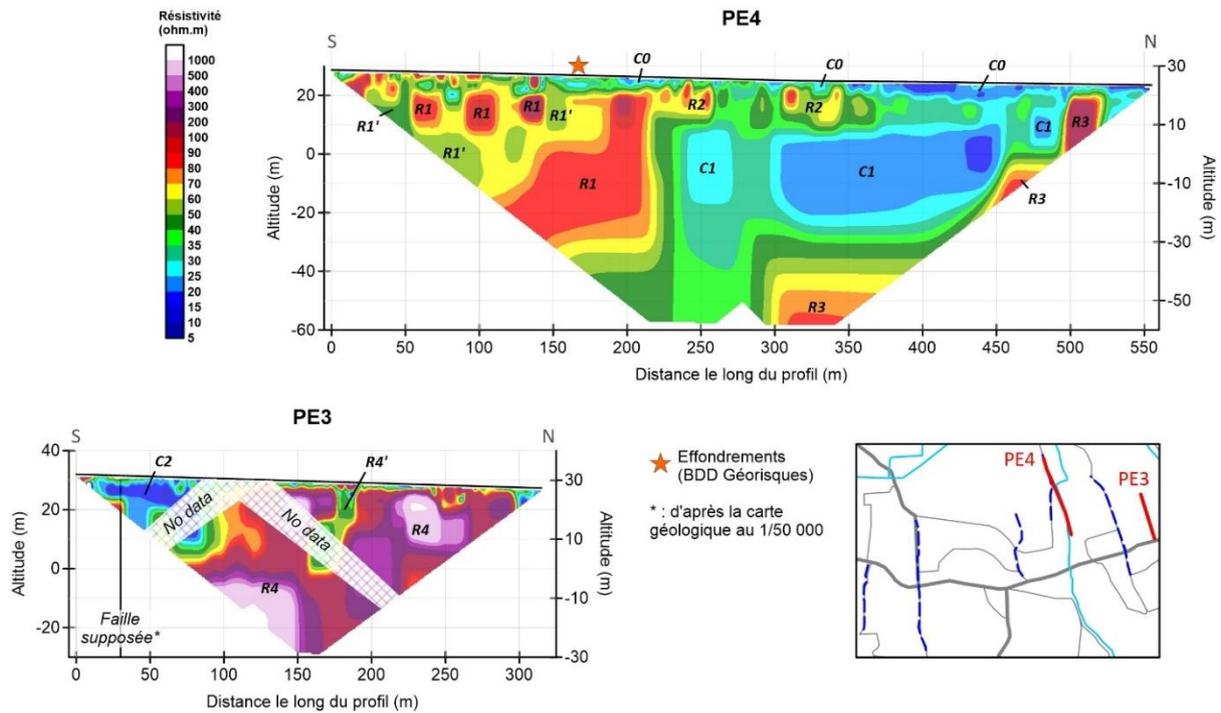


Figure 23 : Coupes de résistivité des profils PE4 (haut) et PE3 (bas).

Le profil PE3 est également divisé en deux parties avec au Sud, des terrains très conducteurs (C2, <25 ohm.m, ■■■■■), et au Nord des terrains très résistants (R4, >100 ohm.m, ■■■■■). Une anomalie conductrice verticale (10 m de large, 30 m de hauteur) est observée au sein de ces terrains très résistants (R4', entre 35 et 60 ohm.m, ■■■■■).

#### 4.5.2. Coupes en sismique réflexion

Au total, cinq (5) coupes sismiques sub-parallèles les unes aux autres ont été acquises, elles sont localisées sur la Figure 22. Elles sont toutes de direction approximativement Sud-Nord. Les coupes sismiques sont présentées de la Figure 24 à la Figure 28 (PS1 à PS5). La moitié nord de la ligne sismique PS4 est positionnée au même endroit que la partie nord de la ligne électrique PE4. Le forage BRGM n°2 est également situé sur le même parcours. L'analyse de l'ensemble des données permet d'établir une compréhension de la géométrie des structures. La méthode d'acquisition permet d'identifier des réflecteurs sismiques jusqu'à 500 m de profondeur. Néanmoins, les essais d'interprétation se sont arrêtés au maximum à 200 mètres de profondeur. Les profils sismiques réflexions ont été transformés de seconde (temps double) en profondeur par GEO2X. La méthodologie de traitement des données est décrite dans leur rapport (Annexe 3).

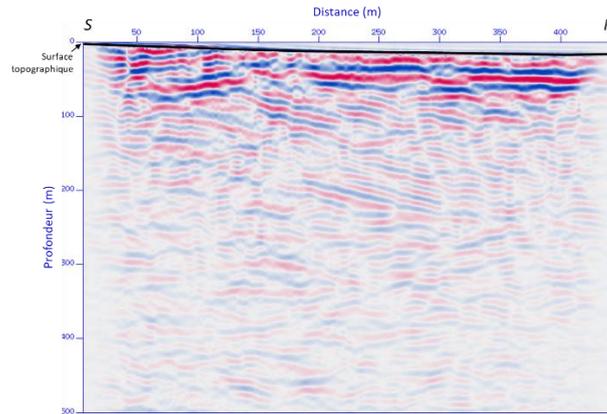


Figure 24 : Coupe sismique du profil PS1.

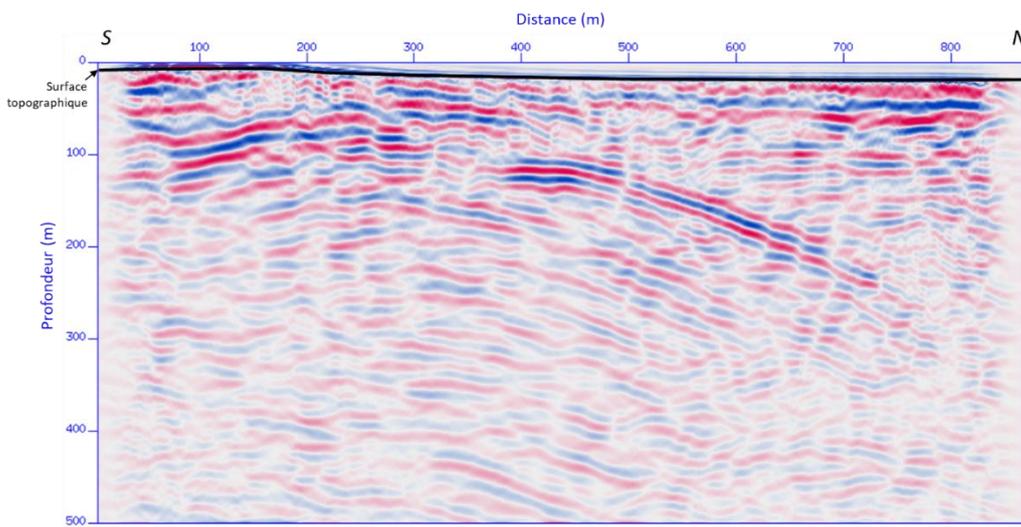


Figure 25 : Coupe sismique du profil PS2.

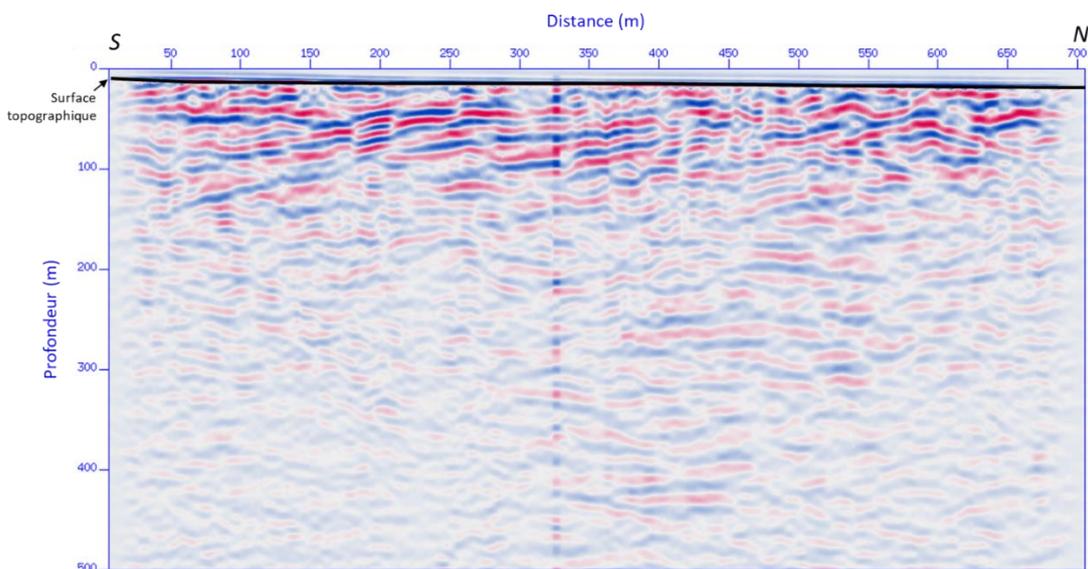


Figure 26 : Coupe sismique du profil PS3.

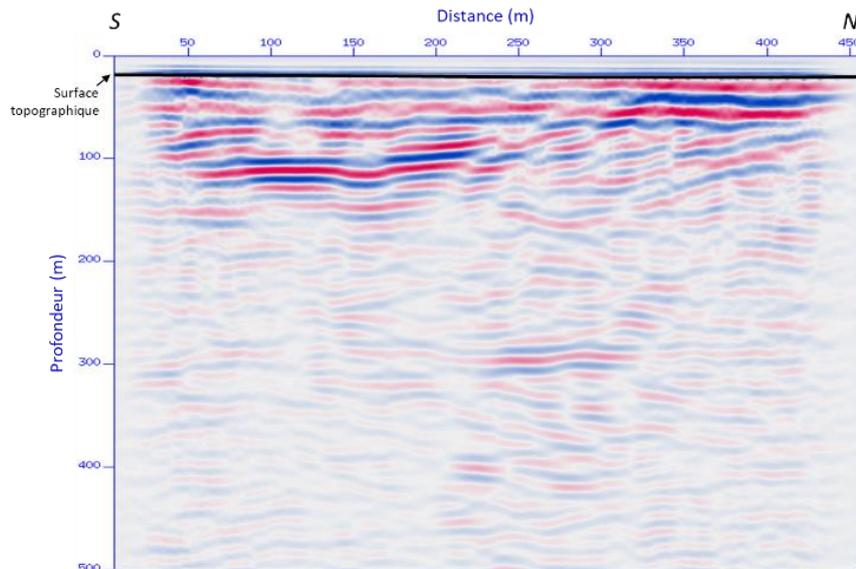


Figure 27 : Coupe sismique du profil PS4.

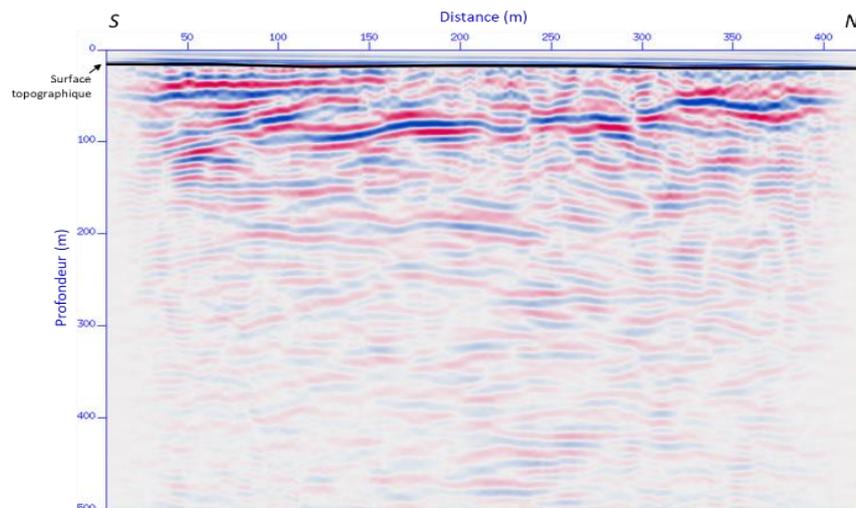


Figure 28 : Coupe sismique du profil PS5.

#### 4.5.3. Diagraphies en forages

Les données de diagraphies différées en forages sont présentées à la Figure 29.

Les diagraphies réalisées dans les trous de forages correspondent :

- au rayonnement gamma naturel qui mesure la radioactivité naturelle des terrains. Cela permet de distinguer notamment l'argile contenue dans les pélites et de bien les distinguer des grès riches en quartz et pauvres en argiles ;
- à l'induction qui mesure la résistivité des terrains et permet de bien corrélérer la lithologie décrite en forage et la résistivité mesurée le long des profils électriques.



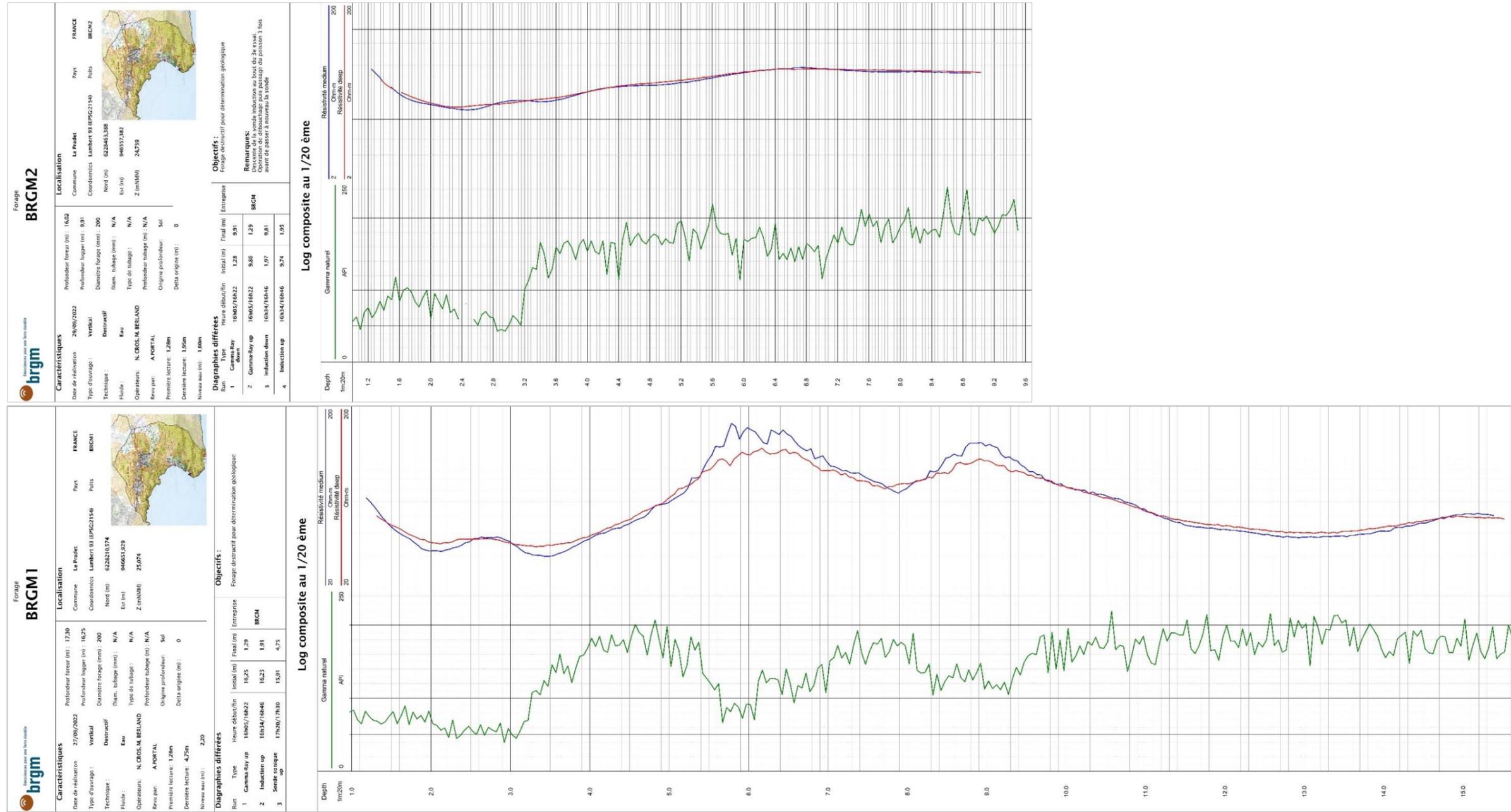


Figure 29 : Logs composites des diagraphies différées en forages des forages BRGM1 (ci-contre) et BRGM2 (ci-dessus).



## **4.6. INTERPRÉTATION GÉOLOGIQUE DES PROFILS GÉOPHYSIQUES**

### **4.6.1. Données lithologiques et exploitation des données de forages**

La première étape est de caler les coupes géophysiques (sismiques et TRE) par des données lithologiques obtenues par forage. Pour cela, les données des anciens sondages issues de la bibliographie et de la Banque de données national du Sous-Sol (la BSS), ainsi que les nouvelles acquisitions sur les deux sondages carottés réalisés (BRGM1\_SC2022 et BRGM2\_SC2022) ont été utilisées.

La Figure 30 montre le positionnement des 13 forages exploités pour interpréter les profils géophysiques (les références et les descriptions géologiques sont en Annexe 2 de ce rapport). Ces forages sont principalement issus de la BSS, des rapports des hydrogéologues agréés sur les forages d'exploitation d'eau potable de la Foux et de Fontqueballe, ainsi que des études géotechniques de reconnaissance des différents mouvements de terrain qui ont eu lieu sur la commune.

Ce travail a également permis de répertorier les forages dans lesquels la présence de gypse a été décrite (point jaune sur la Figure 30). Il s'agit notamment de deux sondages de GEOTERRIA qui décrivent la présence de gypse en grande quantité sur près de 10 m d'épaisseur, sans donner d'indication sur l'âge ou l'horizon de la formation associée. La description lithologique du forage d'eau de Fontqueballe indique la présence de gypse dans le Muschelkalk sans information de quantité, ni de position au sein de la pile sédimentaire du Muschelkalk. Il en est de même pour le Forage F2 qui a servi de forage de reconnaissance pour le forage d'exploitation en eau de Fontqueballe.

L'extrait des descriptions de chaque forage est disponible en Annexe de ce rapport.

Les sondages carottés BRGM1\_SC2022 et BRGM2\_SC2022 ont été implantés au droit du profil électrique PE4 et la partie nord du profil sismique PS4 respectivement, afin de définir la nature des lithologiques qui s'expriment le long des profils (Figure 22).

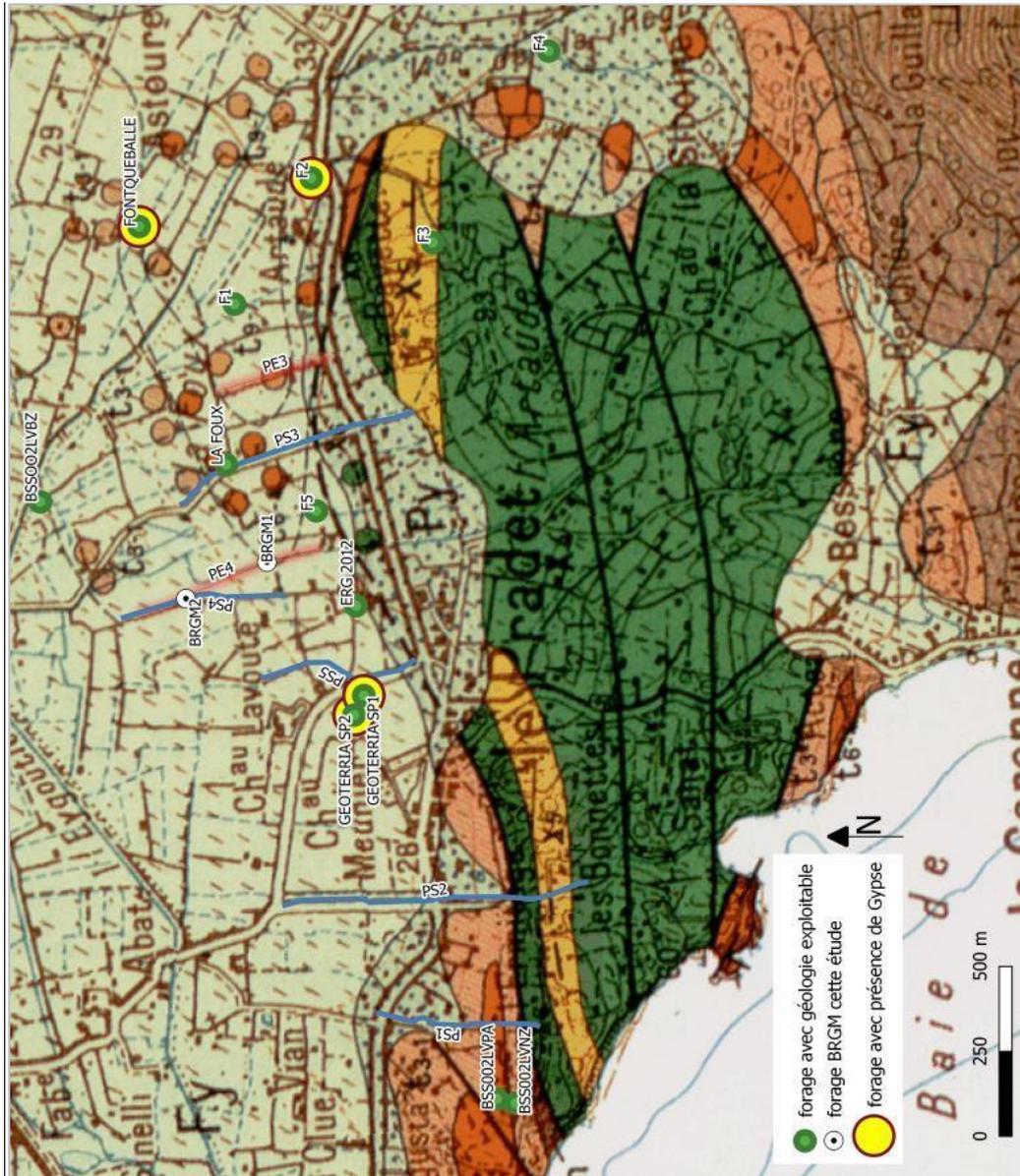


Figure 30 : Localisation des forages avec suffisamment de données exploitables pour l'interprétation réalisée pour cette étude.

#### 4.6.2. Interprétation des profils électriques (avec recouplement du profil sismique PS4)

Lorsque l'on met en correspondance les mesures de diagraphie et le relevé lithologique des forages carottés (Figure 17, Figure 18 et 27) :

- les pélites se distinguent par une résistivité plus faible que le grès (inférieure à 90 ohm.m) et une radioactivité supérieure au grès (supérieure à 150 API) ;
- les grès se distinguent par une résistivité plus importante que les pélites (supérieure à 90 ohm.m) et une radioactivité inférieure aux pélites (inférieure à 150 API).

Ainsi, il est possible d'interpréter en terme lithologique le profil électrique PE4 (Figure 31). La distinction entre les pélites et les grès n'est cependant pas réalisée sur les profils sismiques. Seule la résistivité permet de le faire.

Nous constatons que les failles interprétées sur le profil sismique (d4 et d5) correspondent bien avec les discontinuités électriques (Figure 31 et Figure 32). Les niveaux de grès, qui sont plus résistifs que les couches de pélites, sont affectées suivant le décalage des compartiments à un jeu apparent effondré (cette hypothèse étant confirmée par les profils sismiques, R1a? et R1b?).

Au niveau du forage BRGM1, les roches identifiées correspondent à la formation des Buntsandstein. Le niveau marqueur repère constitué par le niveau à pseudomorphoses cubiques à cristaux de sel permet de situer le sommet des grès du Buntsandstein. Nous pouvons placer le niveau de base du Muschelkalk  $t_{3a1}$  (ou niveau de décollement  $\Phi 1$ ) qui serait sub-affleurant et qui est complètement érodé au droit du forage BRGM1 (puisque les formations du Muschelkalk ne sont pas décrites dans le forage carotté). En outre, la présence du gypse dans ces formations du Muschelkalk explique les effondrements, affaissements et fontis (étoiles rouges sur la Figure 31) qui sont proches de PS4. Le gypse peut avoir des épaisseurs qui varient énormément sur peu de distance latérale dans les horizons sédimentaires, comme le montre son absence au droit du forage BRGM1 et sa présence observée au droit des effondrements localisés à proximité du forage.

Les effondrements (fontis) au niveau du forage BRGM2 (étoiles rouges projetées sur les profils), pourraient être également expliqués par le niveau de base du Muschelkalk associé au niveau de décollement  $\Phi 1$ .

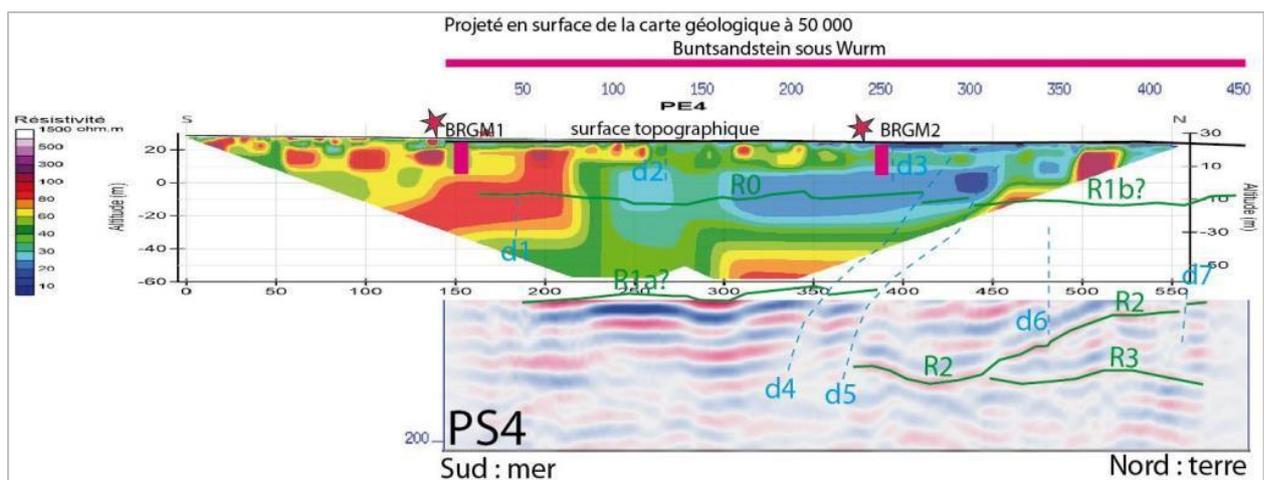


Figure 31 : Profil électrique PE4 superposé aux interprétations du profil sismique PS4 avec localisation des 2 forages carottés du BRGM.

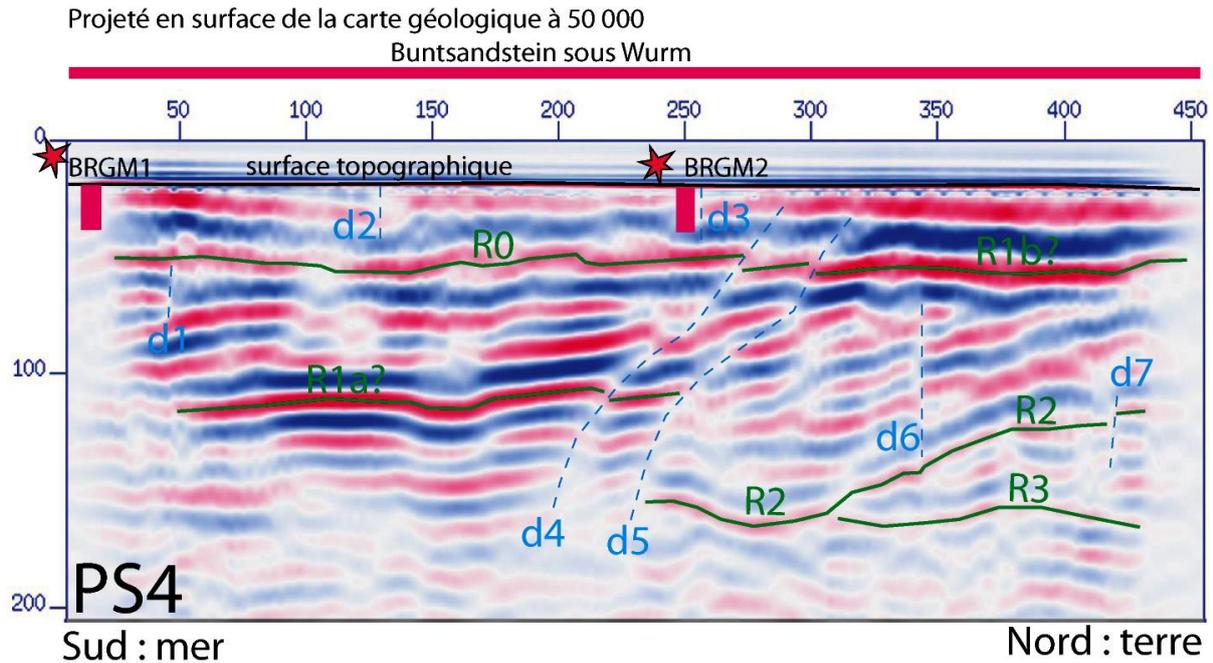


Figure 32 : Profil PS4 avec différents réflecteurs sismiques (Rx) et discontinuités supposés (dx).

Le profil électrique PE3 (Figure 33) est plus difficilement interprétable car les sondages disponibles sont plus éloignés. Seule la carte géologique nous permet de subodorer une partie sud assez conductrice dominée par les phyllades du socle et une partie nord par les formations du Muschelkalk qui sont quant à elles très résistantes (jusqu'à 1000 ohm.m : calcaire, gypse ?).

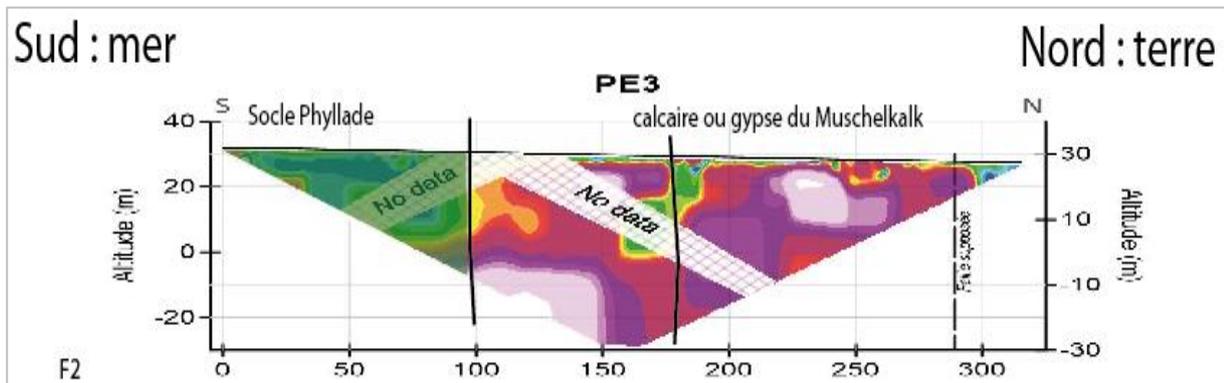


Figure 33 : Profil électrique PE3.

#### 4.6.3. Interprétation des coupes en sismique réflexion PS1, PS2, PS3 et PS5

À l'aide des sondages issus de la bibliographie, des données de surfaces acquises dans le cadre de ce projet ainsi que de la carte géologique à l'échelle 1/ 50 000<sup>e</sup> existante (carte géologique n° 1064 TOULON), une interprétation géologique a été proposée pour les profils sismiques. Au vu de la faible quantité de données, les incertitudes restent cependant relativement élevées, notamment en ce qui concerne les calages lithologiques dû aux manques d'informations stratigraphiques. Les propositions d'interprétation devront encore être affinées et ne seront pas proposées dans ce rapport, toutefois elles permettent d'être une base de discussion.

Les épaisseurs issues des profils sismiques sont à relativiser (en effet, il s'agit d'une transposition temps/vitesse des ondes sismiques, cf. le rapport sismique de GEO2X en Annexe).

Les éléments de calage permettant d'interpréter les coupes sismiques sont également peu nombreux car aucun contact lithologique repère n'a été recoupé par les nouveaux forages carottés, ce qui aurait apporté une estimation plus précise des profondeurs réelles des discontinuités observées. La profondeur des forages était limitée par le financement plus conséquent nécessaire à de telles investigations par multiplication des forages profonds avec un maillage plus resserré. Toutefois, et de manière peut être non systématique, la base des grès du Buntsandstein formée par de gros bancs de conglomérat est relativement bien contrastée sur les profils (réflecteurs de forte amplitude et continus). Il s'agit notamment des réflecteurs annotés :

- R1a, R1 pour PS1 ;
- R1a? R1b? pour PS2 ;
- R3 pour PS5 ;
- R1a R1b pour PS4.

Le réflecteur R4 sur le PS2 est également bien contrasté et pourrait correspondre à la base des grès du Buntsandstein. Seulement, il peut être également interprété comme des niveaux rhyolitiques ou de conglomérats intercalés dans la série permienne.

Ce socle permien sous-jacent n'a pas été représenté sur les profils car nous manquons de données pour les interpréter correctement. Ce cas est uniquement certain sur le profil PS1 où les affleurements de conglomérat ont pu être observés et confirmés. Les formations gréseuses du Buntsandstein reposent généralement en discordance angulaire sur celles permienes. Les formations intra-permiennes présentent également de nombreuses discordances angulaires. Il peut s'agir :

- R3/R3 sur PS1 ;
- R3/R4, R5/R6 sur PS2 ;
- R4/R6, R5/R7 sur PS5 ;
- R2/R3 sur PS4 ;
- R4/R7, R6/R8 sur PS3.

Il est également difficile, voire impossible, de bien distinguer les calcaires, des phyllades et des grès à partir des profils sismiques car leur réponse au signal sismique peut être équivalente pour ces lithologies. La carte géologique à l'échelle 1/50 000<sup>e</sup> sur le PS1, avec les calcaires du Muschelkalk et les grès du Buntsandstein le montre très bien.

La sismique réflexion ne permet pas de visualiser des objets géologiques qui ne présentent pas de contraste d'impédance. Par conséquent, la foliation verticale des phyllades est sismiquement transparente. Nous n'avons pas pu tracer le contact anormal des phyllades sur la couverture sédimentaire. Il semblerait néanmoins que de petites discontinuités verticales interrompent les réflecteurs sismiques. Cela viendrait confirmer les coupes géologiques de A2GE au niveau de la calanque du Pin-de-Galle (cf. Annexe).

Le profil PS3 met en évidence les formations du Muschelkalk (forage de la Foux) qui se retrouvent sous la forme d'un synclinal (réflecteur R5) dans les formations du Buntsandstein, ce qui démontre bien que les surfaces de décollement ne sont pas uniquement plates et horizontales mais qu'elles peuvent être plissées (comme au niveau de la calanque du Pin de Galle, Figure 15) avec l'ensemble des formations géologiques. Ce synclinal est bien représenté sur la feuille géologique au 50 000<sup>ème</sup>.

De manière générale, la présence des effondrements identifiés en surface (étoiles rouges, Figure 34) s'explique par la proximité des formations riches en gypse (PS5 et PS3).

L'interprétation des profils sismiques conduit toutefois à proposer que :

- la difficulté de tracer sur toutes les coupes sismiques le contact Permien/Buntsandstein qui est *a priori* caractérisé par des réflecteurs bien contrastés ;
- le fait que les grès et pélites du Buntsandstein et du Permien présenteraient des discordances angulaires stratigraphiques (ces discordances pourraient également être interprétées comme des discontinuités structurales) ;
- l'épaisseur du Muschelkalk argileux et gypseux varie fortement et pourrait largement dépasser 30 m d'épaisseur ;

Les effondrements sont généralement en lien avec les formations riches en gypse et que ces dernières sont également associées aux niveaux de décollement.

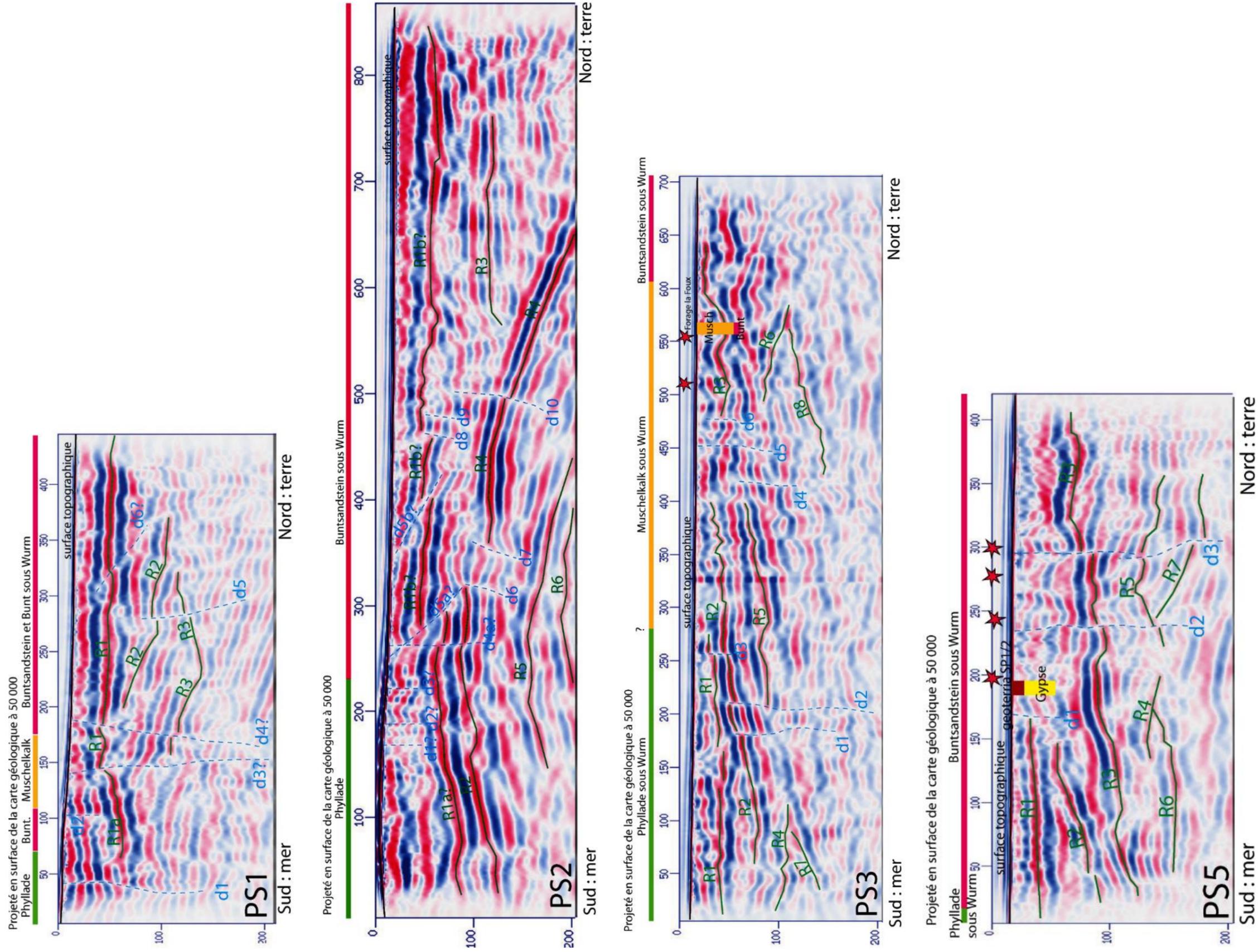


Figure 34 : Proposition d'habillage des profils sismiques PS1 PS2, PS3 et PS5. R = Réflecteur sismique marquant, d= discontinuités marquées. Les numéros sont indépendants et ne peuvent pas être reliés entre profils. Au vu du manque de données et de quelques incohérences avec les forages et la carte géologique, ces profils peuvent difficilement être totalement habillés par une interprétation géologique.



## 5. Hydrogéochimie

### 5.1. PRINCIPE ET OBJECTIFS DE LA RECHERCHE

L'hydrogéochimie permet d'étudier l'origine et les cheminements de l'eau à travers les traces laissées par échanges entre les encaissants (les roches, de natures variées) et les eaux souterraines qui les traversent (on parle de "signature hydrochimique" de l'eau).

Plusieurs paramètres, comme le temps de résidence, la composition originelle de l'eau, celles des roches, les conditions physico-chimiques des milieux traversés (pH, température, conditions d'oxydoréduction...) confèrent à l'eau prélevée en un point des caractéristiques qui permettent de séparer les prélèvements en populations et même, dans les cas les plus favorables, de calculer les mélanges entre des pôles hydrochimiques prédéfinis.

Dans le cadre de cette étude, la campagne de prélèvements hydrochimiques avait pour but de voir si les eaux prélevées dans et autour du glissement du Pin de Galle avaient été en contact avec des niveaux de gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) ou d'anhydrite ( $\text{CaSO}_4$ ). Le gypse est en effet soluble dans l'eau à raison d'environ 2,5 g/L aux températures inférieures à 20 °C<sup>5</sup>, et apporte à celle-ci des ions sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) et calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ). Le calcul de l'indice de saturation des eaux vis-à-vis du gypse<sup>6</sup> ( $\text{IS}_G$ ) apportera donc de précieuses informations sur la présence ou non d'évaporites dans le secteur.

---

<sup>5</sup> : Entre 0 et 20 °C, la solubilité varie quasi linéairement de 2,15 à 2,53 g/l et présente un optimum de 2,67 g/l à 40 °C (Daupley *et al.*, 2015 cité *in* Charmoille *et al.*, 2018).

<sup>6</sup> :  $\text{IS}_G$  positif : eau sursaturée en  $\text{SO}_4^{2-}$  → dépôt de gypse ;  $\text{IS}_G$  négatif : eau sous-saturée en  $\text{SO}_4^{2-}$  → dissolution de gypse,  $\text{IS}_G$  proche de 0 : eau à l'équilibre avec le gypse.

## 5.2. DESCRIPTION DE LA MÉTHODOLOGIE EMPLOYÉE

Une campagne de 8 prélèvements d'eau souterraine dans et autour du glissement a donc été organisée, de manière à obtenir des échantillons d'eau en contact avec les principales formations rencontrées à savoir :

- les formations du Muschelkalk (Trias moyen) : calcaires et dolomies, parfois vacuolaires, argile, cargneule et gypse ;
- les formations du Trias inférieur : grès arkosiques à dragées de quartz (grès bigarré provençal) et pélites ;
- les formations du socle : Les phyllades (série du Cap Sicié) et quartzites ;
- les formations au sein du glissement : Muschelkalk et/ou grès du Trias inférieur.

Les formations géologiques (Muschelkalk, Trias inférieur et phyllades/quartzites) présentent des faciès lithologiques très différents, par conséquent, les eaux souterraines, qui circulent en leur sein, n'acquièrent pas la même composition en fonction de la nature des roches qu'elles traverseront.

Des forages, puits (ou tout autre ouvrage qui permet l'accès au sous-sol) ont donc été choisis parmi ceux recensés dans les études antérieures, à partir des données de la BSS<sup>7</sup>, ou après une visite exploratoire du secteur afin de rechercher des puits, en fonction des formations qui étaient atteintes.

La carte de répartition des sites retenus pour l'échantillonnage des eaux en fonction de la nature du substrat est présentée en Figure 35. Le Tableau en Figure 36 fournit les caractéristiques de chaque site.

---

<sup>7</sup> : BSS : Banque de Données du Sous-Sol, gérée par le BRGM au titre du Code Minier.



Libellé Carte	X lamb93	Y lamb93	Niveau capté	Prof (m)	Cote sol (m)	Origine	Commentaire
F1	947413	6228330	Muschelkalk	100,0	27,0	Campagne CEGE	
I1	944871	6227515	Glissement	20,0	37,5	Expertise Baccuzzi	Tout petit diamètre
A-PZ1	944832	6227480	Glissement	17,1	17,1	Campagne IMSRN - H2EA	Tout petit diamètre
Puits Lemarchand	947213	6227159	Phyllades (Aluvions)	13,0	57,0	Campagne BRGM	Gros diamètre
AEP Fontqueballe	947673	6228599	Muschelkalk	60,0	28,3	Inventaire H2EA	Prélèvement robinet
AEP la Foux	946947	6228352	Muschelkalk	40,0	28,3	Inventaire H2EA	Prélèvement robinet
Forage M. Roux	944761	6227638	Trias inf. (?)	100,0	0,0	Repérage campagne 2022	Prélèvement robinet
F3	947610	6226277	Phyllades	80,0	58,0	Campagne CEGE	

Figure 36 : Tableau récapitulatif des points de la campagne des prélèvements hydrogéochimiques réalisés en mai 2022 par le BRGM.

Grâce aux six points choisis en dehors du glissement il est possible, d'une part, d'accéder aux différents types de composition chimique d'eau, et d'autre part, de discuter de la plausibilité d'une interaction avec des niveaux de gypse présents dans les terrains du Muschelkalk. En outre, l'analyse des points prélevés dans le glissement permet de comparer les eaux dans le glissement à celles circulant dans les autres formations et en rattacher l'origine.

### 5.3. PRÉLÈVEMENTS ET ANALYSES

La campagne de prélèvements a été organisée les 3 et 5 mai 2022, de manière à prélever les eaux souterraines dans les huit points identifiés précédemment (Figure 36), grâce à trois pompes électriques et à des préleveurs manuels (il s'est avéré impossible de pomper préalablement les deux ouvrages dans le glissement, le diamètre des sondages étant inférieur à celui de la plus petite pompe à disposition).

En plus des données physico-chimiques acquises sur le terrain (température, conductivité électrique, pH, Eh, O<sub>2</sub> dissous), les analyses chimiques ont porté sur les éléments suivants :

- Anions majeurs : Chlorure (Cl<sup>-</sup>), Nitrate (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), Sulfate (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), Hydrogénocarbonate (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>), Carbonate (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) ;
- Anions mineurs : Bromure (Br<sup>-</sup>), Fluorure (F<sup>-</sup>), Nitrite (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>), Phosphate (PO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) ;
- Cations majeurs : Calcium (Ca<sup>2+</sup>), Magnésium (Mg<sup>2+</sup>), Potassium (K<sup>+</sup>), Sodium (Na<sup>+</sup>), Ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) ;
- Autres éléments majeurs : Fer total (Fe) et silice dissoute (SiO<sub>2</sub>).

Le tableau synthétique des résultats des analyses suite à la campagne de mai 2022 est porté en en Figure 37.

	NH4 Ammonium	NO2 Nitrites	Br- Bromure	F- Fluorure	Cl- Chlorure	NO3 Nitrates	SO4 Sulfates	Ca Calcium	K Potassium	Fe Fer	Mg Magnésium	Na Sodium	Si Silicium	HCO3 Hydrogène nocarbonates
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg(SiO2)/L	mg/L
F1	1.77			1.73	60		1024	398	4.5		19.3	36.1		
I1		0.02	0.45	0.16	131		37.4	119	18.3	0.251	19.6	56.9	27.2	375
A-PZ1				0.42	199	1297		511	4.1		55.3	179	17.9	418
Puits Le Marchand			0.18	0.16	98.1		245	250	0.9	0.117	22.6	61.8	15.5	553
Fontqueballe			0.29	0.16	52.3	49.8	218	207	1.1		27.3	28.8	11	378
Foux		0.01	0.25	0.24	146	2.6	442	211	13.9	0.055	53.8	142	12.9	471
M, Roux			0.24	0.21	52.4	39.9	261	217	1.3		27.2	30.7	12.1	389
F3			0.29	0.19	176		143	128		6.22	24	85.1	6	263

Libellé Carte	Niveau capté	Date	Physico-chimie (terrain)						Prof eau* (m)	Commentaires liés aux mesures de terrain
			Temp eau (°C)	Cond 25°C (µS/cm)	pH (upH)	O2 dissous (%)	Eh (mV)			
F1	Muschelkalk	05/05/2022	17.7	1968	9.66	17	-281	3.33	Prélèvement à la pompe MP1. Profil atypique, forte odeur	
I1	Glissement	05/05/2022	17.9	1007	7.24	40.6	-267	dénoyé	Prélèvement au Bailier	
A-PZ1	Glissement	05/05/2022	17.9**	2760**	6.75**	31.77**	165**	9**	Prélèvement à la pompe SDEC	
Puits Lemarchand	Phyllades (Aluvions)	05/05/2022	14.8	1468	7.13	9.3	-77	4.15	Prélèvement à la grosse pompe	
AEP Fontqueballe	Muschelkalk	03/05/2022	17.7	1149	6.98	85.5	203.5	X	Prélèvement au robinet. Pas de mesure de niveau possible	
AEP la Foux	Muschelkalk	03/05/2022	17	1208	6.72	75	250	32.87**	Prélèvement au robinet. Repère de mesure : 2,98 m/sol	
Forage M. Roux	Trias inf. (?)	03/05/2022	16.9**	1828**	7.08**	47.6**	237.3**	X	Prélèvement après 2 min au robinet. Eau légèrement colorée, odeur & MES.	
F3	Phyllades	05/05/2022	18	1200	6.99	22.1	-140.3	10.93	Prélèvement à la pompe MP1	

\* : profondeur mesurée lors du prélèvement, rapportée au sommet du tubage

\*\* : mesures effectuées avant le pompage

Figure 37 : Tableaux synthétiques des mesures chimiques sur les 8 points de prélèvements

## 5.4. INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

Les bilans ioniques sont équilibrés (un peu à la limite des +/- 5 % pour les deux points du glissement : I1 et A-PZ1), les analyses sont donc exploitables.

Le point F1 a un pH élevé (9,77), les ions (bi)carbonates n'ont pas été décelés, ce qui indique clairement une eau circulant (probablement mal) dans un milieu plutôt basique. Pour information, le CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, généralement présent en milieu basique, n'a pas été dosé.

La présence dans ce milieu, avec un potentiel Redox très négatif (- 288 mV), d'une très forte concentration de sulfates peut surprendre. Cela laisse penser qu'une source importante de sulfates est à proximité. En outre, on s'attendrait à des espèces réduites telles que les sulfites ou les sulfures comme le laisse subodorer l'odeur d'H<sub>2</sub>S lors du prélèvement. Cependant, les sulfures n'ont pas été analysés.

En F1, il est probable qu'une source de sulfate "alimente" l'eau, dont l'origine est vraisemblablement à rechercher dans la présence de niveaux gypseux très proches qui pourraient être soumis à dissolution.

Sur le point A-PZ1, au niveau du glissement, il semble ne pas y avoir de circulation d'eau. On pense qu'il n'est pas représentatif d'une eau naturelle qui circulerait. Cependant, l'absence de sulfate est problématique et contradictoire du fait du potentiel redox apparemment plutôt oxydant. Le soufre serait peut-être présent à l'état d'espèce réduite si l'on remet en cause la mesure du potentiel redox.

Les points de mesures ont été portés dans un diagramme de Piper sur la Figure 38 ci-dessous.

## Diagramme de Piper

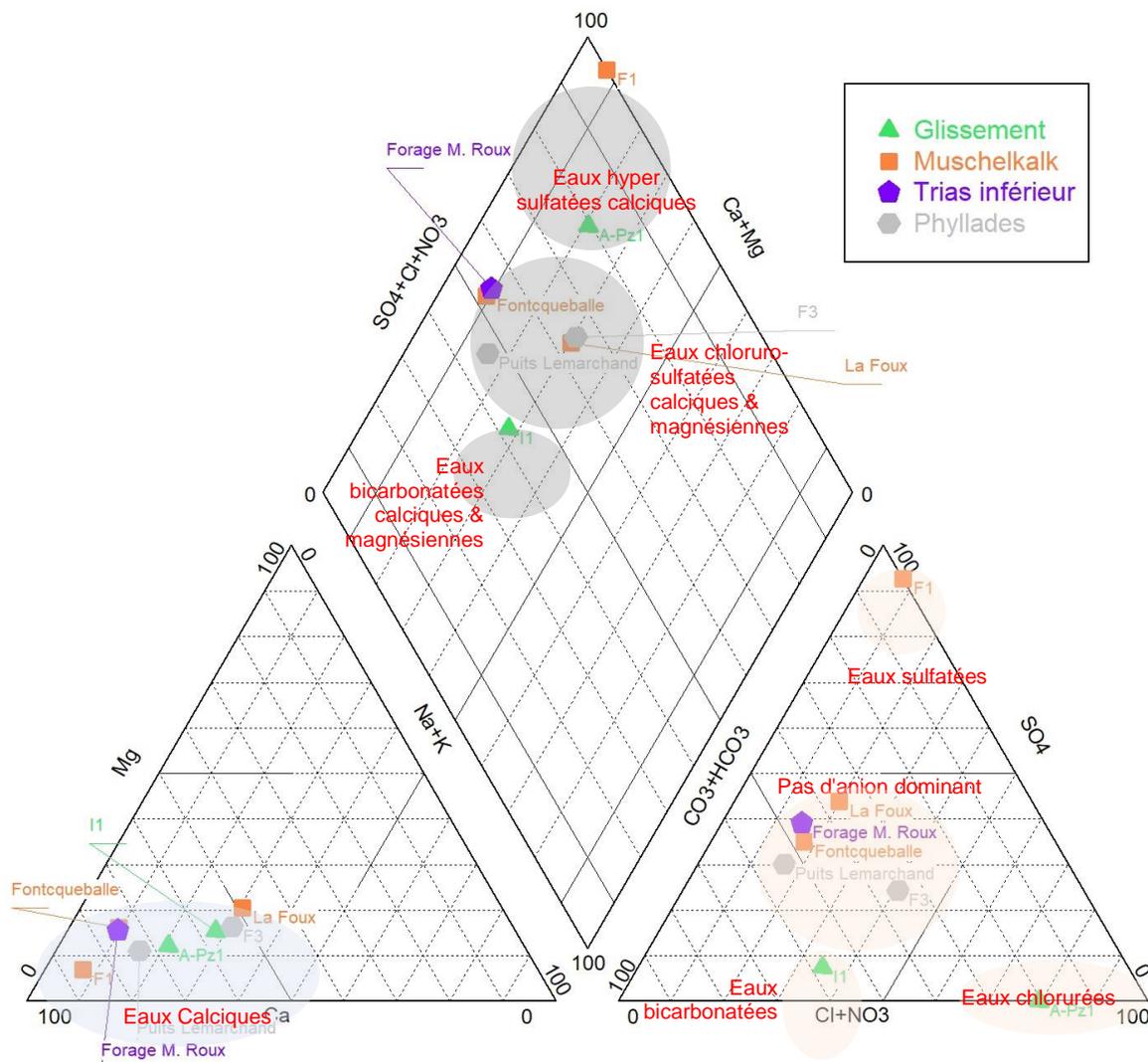


Figure 38 : Diagramme de Piper des points de la campagne hydrochimique de mai 2022.

À la vue de ce diagramme :

- 5 des 8 échantillons peuvent être rattachés au faciès d'eau chloruro-sulfatée calcique et magnésienne. Il n'est pas possible de séparer des familles d'eaux issues des aquifères du Muschelkalk, des grès du Trias et des phyllades à partir des eaux échantillonnées. Il est donc possible que ces différents aquifères soient connectés entre eux ;
- le point F1 (Muschelkalk) relève du faciès d'eau hypersulfatée calcique qui pourrait être relié à la présence de gypse ;
- le point I1 (dans le glissement de la plage du Pin de Galle) correspond quant à lui à un faciès d'eau bicarbonatée calcique et magnésienne ;
- le point A-PZ1, dans le glissement, est en position intermédiaire entre le groupe principal et le point F1, ce qui subodore un mélange entre ces deux pôles.

Le graphique  $[SO_4^{2-}] = f([Ca^{2+}])$  montre une certaine corrélation entre ces deux paramètres (le point A-PZ1 n'est pas représenté au sein du graphique, car les sulfates y sont absents).

Le point F1 montre clairement une relation entre le sulfate et le calcium en lien avec la courbe de dissolution du gypse. Le calcium présent dans les eaux du F1 semble être issu principalement du gypse. Le calcium pour les autres points est associé aux bicarbonates, ce qui tend à éloigner les points de la droite de dissolution.

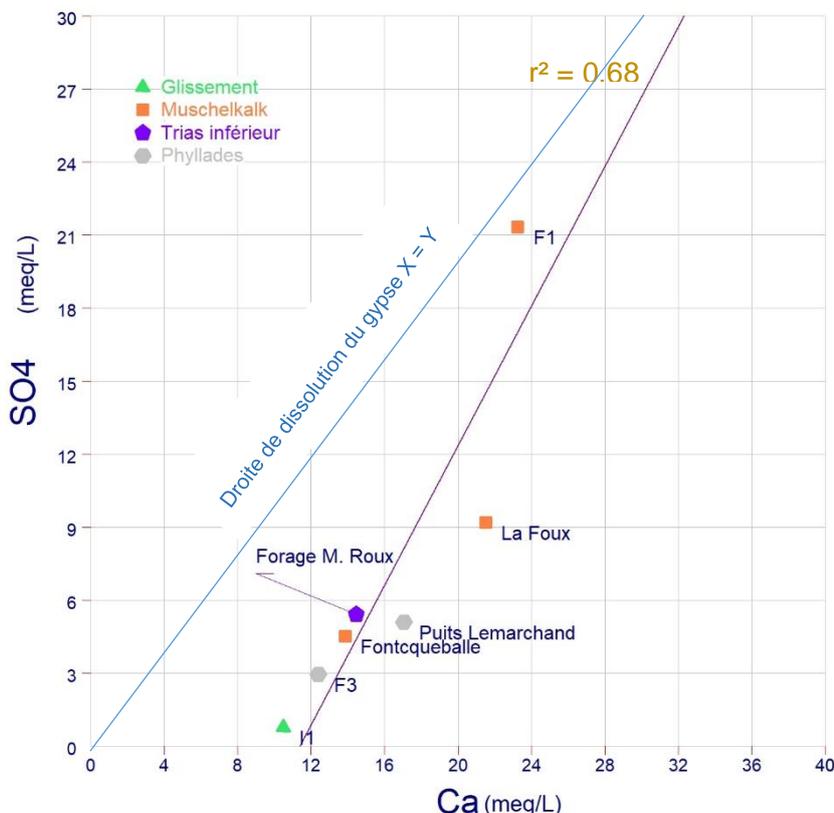
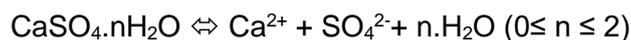


Figure 39 : Graphique  $[SO_4^{2-}] = f([Ca^{2+}])$  pour l'ensemble des points prélevés, sauf A-PZ1.

## 5.5. CONCLUSIONS SUR LES APPORTS DE L'HYDROGÉOCHIMIE

Un certain nombre de points ont pu être montrés, grâce à la campagne de prélèvements et d'analyses réalisée en mai 2022 (en période de particulièrement basses eaux) :

- les eaux prélevées dans le glissement étaient peu circulantes et parfois très minéralisées en basses eaux. Les conditions de prélèvement des eaux dans le glissement ne sont pas idéales (diamètres des trous de puits trop petits et basses eaux) ;
- les teneurs en sulfates et dans une moindre mesure en calcium apparaissent contrôlées par un phénomène de dissolution de minéraux comme le gypse, sur la base d'une équation du type :



Ce point est surtout valable pour F1.

- il existe un faciès d'eau hypersulfatée calcique (F1) qui semble être contrôlé par la présence de gypse et sa dissolution partielle ;
- les faciès d'eau chloruro-sulfatées calciques et magnésiennes des eaux souterraines du Muschelkalk, grès du Trias et phyllades du socle sont difficilement discernables. Ils s'alignent suivant une droite qui laisse supposer un contrôle de la chimie quand même par le gypse ;

- le point A-PZ1, malgré une analyse moyennement représentative, semble être un mélange entre le faciès d'eau hypersulfatée calcique de type (F1) et les faciès d'eau chloruro-sulfatées calciques et magnésiennes des eaux souterraines du Muschelkalk, grès du Trias et phyllades du socle.

## 6. Discussion sur les données acquises

### 6.1. CARTE GÉOLOGIQUE ET STRUCTURALE DU SECTEUR

L'ensemble des points d'observations de terrain, de sondages et les interprétations des profils sismiques et de résistivité conduisent à mettre en évidence que le contexte géologique plissé et structural est plus complexe à petite échelle que ce qui est représenté par la carte géologique à l'échelle 1/50 000 du secteur et que la zone d'étude du Pin de Galle doit être appréhendée plus finement. La réalisation d'une nouvelle carte géologique plus précise et prenant en compte l'ensemble des éléments collectés demanderait davantage de temps et d'investigations et ne constitue pas l'objectif de cette étude. Les observations de terrain ne permettent pas à ce stade de statuer ou non sur la présence du gypse dans le glissement du Pin-de-Galle. Cependant, au regard des premiers échanges avec M. J.-P. Carron, la mise à jour des données géologiques de surface se poursuivront.

La carte présentée en Figure 40 synthétise l'ensemble des données relevées pertinentes pour l'objectif de cette étude et permet une représentation des objets géologiques présents sous la couverture alluvionnaire. Elle propose une tentative d'individualisation des différents niveaux gypsifères qui sont associés aux niveaux de décollement et plus particulièrement aux niveaux  $\Phi 1$  et  $\Phi 2a/b$ .

À l'Est du secteur, au niveau de PS4, la base de Muschelkalk marneux riche en gypse et associé au niveau de décollement  $\Phi 1$  est sub-horizontale (ou relativement plate) et tangente à la plaine, le tracé cartographique serait alors plutôt en forme de digitation.

Au niveau de PS3, le Muschelkalk (argiles et calcaires indifférenciés) forme une cuvette de type synclinal dans les grès du Buntsandstein. Au sein de ce Muschelkalk, les différentes formations marneuses riches en gypse du Muschelkalk associées aux niveaux de décollement  $\Phi 1$  et  $\Phi 2a/b$  sont présentes.

Le contact faillé nord des phyllades (en vert) avec les grès du Buntsandstein serait affecté par un réseau de failles verticales à compartimentation sud effondrée comme l'atteste les mesures structurales (Figure 11 et Figure 12) et les coupes A et F de la calanque du Pin-de-Galle (A2GE, 2018 en Annexe). Le corolaire serait que le niveau de décollement sous-jacent aux phyllades serait en profondeur, ce qui laisserait penser que la présence de gypse est également possible sous les phyllades s'il s'avère que le Muschelkalk y soit présent.

Les différences entre les profils PS2 et PS5 (réflecteur sismique R4 bien marqué en profondeur sur le profil PS2 et absent sur le profil PS5) laissent subodorer la présence d'une faille importante orientée approximativement N20 qui pourrait être reliée plus au sud au niveau du bord de mer (Muschelkalk supérieur en contact avec le Muschelkalk moyen, puis le Buntsandstein). Cette partie du bord de mer, qui affleure bien a d'ailleurs été mise à jour par rapport à la carte géologique au 50 000<sup>ème</sup> de 1969.

Au niveau du Pin-de-Galle, c'est le Muschelkalk supérieur qui affleure, ce qui laisse subodorer la présence des formations sous-jacentes riches en gypse et associées au niveau du décollement  $\Phi 2b$  (Figure 15) qui serait lui-même décalé par la faille bordière nord de la klippe des phyllades (compartiment sud des phyllades effondré).

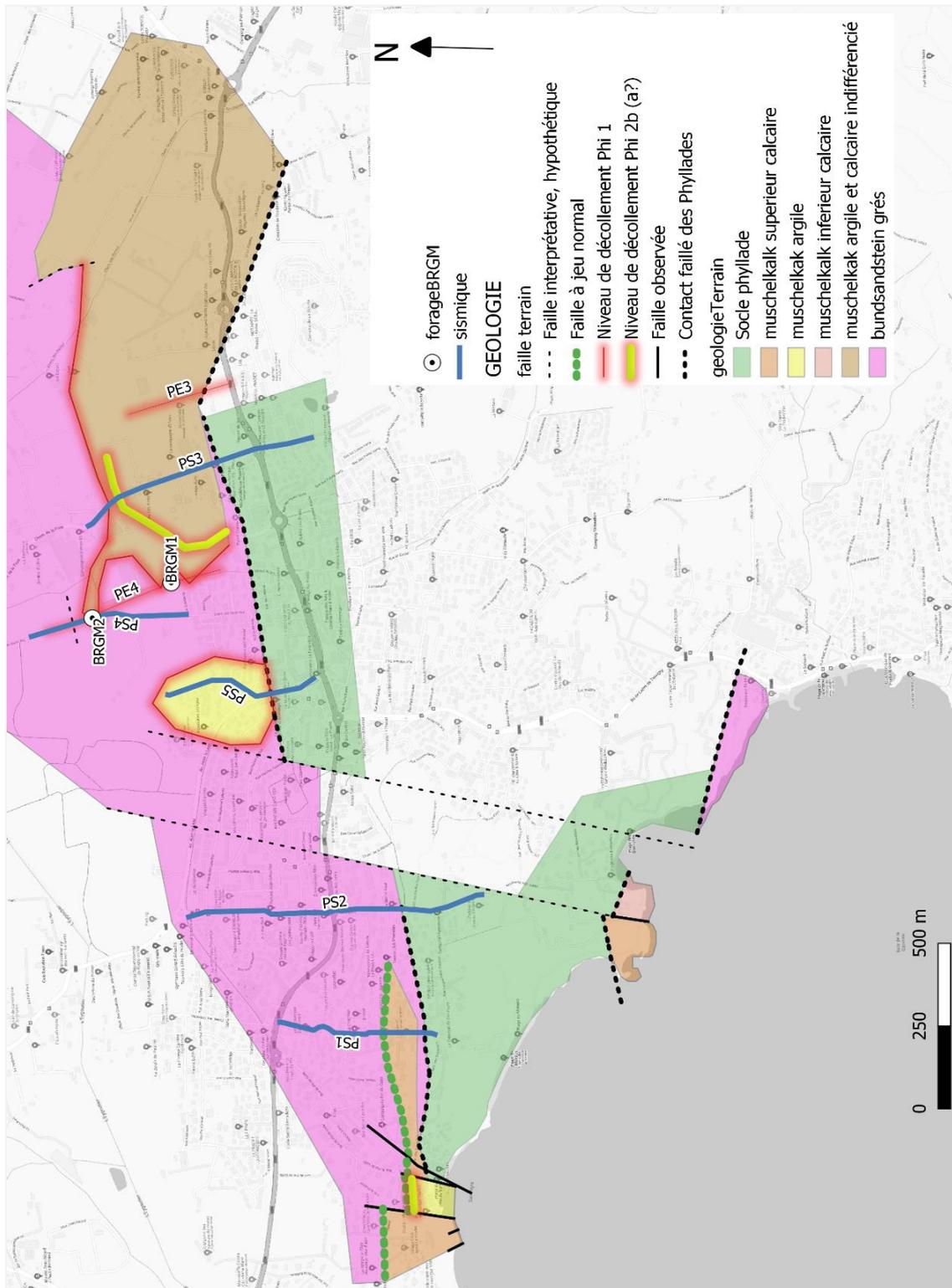


Figure 40 : Proposition de cartographie géologique et structurale révisée. Les tracés sont interprétatifs et constituent une première base de travail pour de futures discussions.

## 6.2. AVIS SUR L'ORIGINE DES GLISSEMENTS/EFFONDEMENTS ET LA PRÉSENCE DE GYPSE AU PIN DE GALLE

Si l'on compare la localisation des effondrements avec les observations géologiques, nous constatons que ceux-ci sont corrélés avec la présence de terrains sous-jacents appartenant au Muschelkalk, donc de niveaux potentiels gypsifères localisés dans le Muschelkalk dont la puissance (l'épaisseur) peut varier de 0 à 30 m. Le gypse a, en effet, bien été recoupé en forage notamment dans leur plus grande puissance (plus de 15 m de gypse) dans les sondages de GéoTerra (Figure 30).

Les forages de reconnaissance concernant les fontis de Saint-Avy entre le PS5 et le PS4 (ERG2012 sur la Figure 30), qui n'ont quant à eux pas reconnu de gypse (Marcot, 2017 ; BRGM/RP- 66706-FR). Cela peut s'expliquer de deux manières :

- soit il n'y a pas de gypse, auquel cas c'est une karstification des calcaires du Muschelkalk qui provoquerait une suffosion des argiles et ainsi un fontis en surface ;
- soit l'accident géologique serait une faille verticale (exempte de gypse) à compartiment sud effondré qui aurait ainsi abaissé en profondeur le niveau de décollement supposé subhorizontal et riche en gypse ;
- soit le gypse est situé à plus grande profondeur et n'a pas été atteint.

Il n'est pas exclu d'avoir du gypse sous les phyllades, car la base de ces dernières constitue un niveau de décollement, ce qui pourrait, entre autres, expliquer l'affaissement (nommé tassement par IMS RN) survenu en 1976 (Source de la donnée : Rousset in IMS RN) au niveau de la calanque de la Pinède.

À l'est de la commune, les niveaux gypsifères de la base des calcaires du Muschelkalk moyen sont associés au niveau de décollement  $\Phi 1$  comme l'a montré le forage BRGM1. Nous touchons également le niveau de décollement  $\Phi 2a$  lorsque nous sommes au sommet de ces calcaires, notamment sur le sondage de Fontqueballe.

Au niveau de la calanque du Pin de Galle, le contexte géologique et structural est différent de celui plus à l'est de la commune. Nous sommes dans les niveaux gypsifères du Muschelkalk avec la présence des niveaux de décollements  $\Phi 2b$  voir  $\Phi 3$ , car il s'agit des calcaires supérieurs du Muschelkalk en série normale et localement replissés en série inversée probablement au sein d'une écaille tectonique.

Du point de vue des analyses géochimiques des eaux, l'eau du point A-PZ1 prélevée à l'intérieur du glissement, semble être un mélange d'eaux stagnantes entre le faciès d'eau hypersulfatée calcique caractéristique de présence de gypse et les faciès homogènes des eaux souterraines du Muschelkalk, grès du Trias et phyllades du socle.

Au regard du nombre de forages réalisés et des investigations géotechniques et observations visuelles sur le terrain dans le secteur du Pin de Galle où il n'a jamais été observé de gypse, il est possible que la quantité de gypse soit réduite localement et distribuée de façon hétérogène par le fluage due aux contraintes tectoniques importantes (plissement, failles, écaillage). Néanmoins, les sondages réalisés sont verticaux dans une stratigraphie qui a probablement été redressée et donc ont tendance à rester dans quelques bancs ou la même lithologie. Ainsi, ils ne sont pas forcément représentatifs de l'ensemble de la série du Muschelkalk. En l'état, le fait d'être au niveau d'un décollement, il est plus que probable qu'il y

ait encore des résidus de gypse non dissous en profondeur ou des lentilles latérales. La question en suspens est de quantifier le volume de ce gypse.

Par principe de précaution, il serait bon de considérer la présence de gypse au niveau de la calanque du Pin de Galle comme fortement susceptible. Il est possible que la dissolution de gypse, même partielle, soit intervenue comme un facteur potentiellement aggravant dans le glissement de terrain survenu après les pluies intenses fin 2014. Le moteur principal du glissement dominant reste quand même la lithologie argileuse de la surface de décollement qui lorsqu'elle est sursaturée en eau lors de fortes pluies viens jouer le rôle de couche savon comme démontrée dans les études géotechniques précédentes (H2EA, IMS RN).

### **6.3. RECOMMANDATIONS A L'ISSUE DE CETTE ÉUDE**

Cette étude montre que la présence de gypse plus en profondeur sous la Calanque du Pin de Galle et les habitations est possible. Le gypse est sensible à la dissolution, et peut provoquer des vides qui déstabilisent et affaiblissent localement les terrains sus-jacents s'il y a circulation d'eau dans le sol et le sous-sol comme dans le cas des infiltrations importantes en période de fortes précipitations.

Une étude complémentaire sur la cartographie de l'aléa glissement de terrain est recommandée pour prendre en considération la susceptibilité de présence de gypse dans le secteur du Pin de Galle, ainsi que la réévaluation des travaux de confortement proposés au regard de ce fait nouveau avant leur mise en œuvre, sauf à considérer qu'ils pourraient être inutiles ou suffisants en l'état.

Ainsi, nous conseillons à la Mairie de communiquer tout d'abord auprès des bureaux d'études qui ont proposé des solutions d'encrages et de confortement des habitations de réviser leur évaluation à la lumière de ces nouvelles connaissances. Nous recommandons à la mairie de s'appuyer sur la maîtrise d'ouvrage pour que les experts en géotechnique valident les solutions proposées précédemment et qu'ils déterminent si elles sont valables également en cas de présence de gypse plus en profondeur ou de faire les préconisations nécessaires.

Cette présente étude et la carte d'aléa glissement réalisée par IMS RN en 2019 devraient être portées à la connaissance du public et alimenter une révision future du plan de prévention d'exposition aux risques.

Par principe de précaution, sans avoir menée d'étude cartographique d'aléas complémentaire, une surveillance accrue par les services techniques de la commune après des fortes intempéries ou épisodes pluvieux prolongés devraient être menées systématiquement. Tous désordres constatés sur les bâtis ou les infrastructures (escaliers, murs, voies d'accès...) devront être décrits et consignés en précisant l'influence des eaux de ruissellement ou d'infiltration. Les écoulements naturels ou d'origine anthropique (générés par l'activité humaine) dans ce secteur devraient être chenalés autant que possible directement vers la mer en respectant la réglementation environnementale et en évitant les eaux stagnantes ou fuites de réseau dans le sol et le sous-sol. Ces préconisations devront inclure la gestion des eaux, afin d'éviter leur circulation/infiltration vers les niveaux sous-jacents contenant potentiellement du gypse en menant une réflexion à l'échelle de la calanque. Des éléments d'aide sont disponibles dans le guide à usage des maires pour la gestion et la prévention du risque mouvements de terrain lié à la présence de gypse en PACA (BRGM-ORRM, 2016).

## 7. Bibliographie

**Caron J.P.H. and Laville, P.** (2016) Paradoxes and inaccuracies in the geological maps of scale 1/50000, which show the Upper Cretaceous of the Southern margin of the Basin of Le Beausset (Provence, France). *Boletín Geológico y Minero*, 127 (2/3): 517-526 ISSN: 0366-0176.

**Cartannaz C.** (2020) Avis sur 3 rapports traitant de l'aléa géologique sur le secteur du Pin de Galle et de la Pinède, le Pradet (83). Rapport BRGM/RP-70139-FR. 29 p., 14 ill.

**Charmoille A., Lecomte A., Kreziak C.** (2018) Guide – Dissolution naturelle du gypse dans le sous-sol – Analyse et gestion des aléas mouvements de terrain de type affaissement et effondrement. Ineris 17-164710-03375A.

**BRGM, ORRM**, 2016, Guide à l'usage des Maires. Gestion et prévention des mouvements de terrain liés à la présence de gypse en PACA, 39 p.

<https://www.observatoire-regional-risques-paca.fr/media/401/download>

**DICRIM** de la commune du Pradet – Document d'Information Communal sur les Risques Majeurs réalisé avec la collaboration du Cyprès (édition 2020).

**DDTM** du Var (2011) Plan de Prévention des Risques –PER) Naturels prévisibles de mouvements de terrain de la commune du Pradet.

**ERG Géotechnique** (2012) Ville du Pradet, Direction des services techniques – Fontis rue St-Avy Diagnostic géotechnique.

**ERG Géotechnique** (2004) Eiffage Immobilier. Projet immobilier « lieu-dit la Foux » 83220 Le Pradet. Etude géologique de constructibilité.

**EDG** (2006) Mairie du Pradet Lieu-dit la Foux – Prospection géophysique et géotechnique en vue de la redéfinition du Plan d'occupation des sols 6 Note de Synthèse.

**Géoterria** (2008) Ville du Pradet Rue Emmanuel Chabirer – Rue Maurice Ravel – Diagnostic géotechnique d'une zone d'affaissement par dissolution de gypse (Affaire n°2008/2727/Pradet/G5/EC).

**Haug E., Michel-Lévy A., Lanquine A., Maury E., Lutaud L., Gouvernet Cl., Blanc J.-J., Philip J., Caron J.-P., Coulon C. et Rouire J.** (1969) Carte géologique de Toulon n°1064 édition 1969, au 1/50 000<sup>e</sup> (BRGM) et notice associée de C. Andrieux et al. (2<sup>ème</sup> édition).

**H2EA** (2018) Étude géologique, hydrogéologique et géotechnique des désordres dans le secteur du Pin de Galle et de la Pinède, le Pradet (83). Volet géologique et hydrogéologique, Décembre 2018.

**IMS RN** (2019) Étude géologique, hydrogéologique et géotechnique des désordres dans le secteur du Pin de Galle et de la Pinède, le Pradet (83). Volet Géotechnique. Document provisoire-deuxième émission. 2016-Juillet 2019.

**IMS RN** (2019) Diagnostique géotechnique. Confortement du glissement du Pin de Galle, Mission de diagnostic G5. Affaire 2016/N1/83/1195 – version provisoire, première émission 14/08/2019, 27 pages plus annexes.

**Marçot N., Genevier M., Abad J., Aslan G., Beccaletto L., Bitri A., Coueffe R., De Michele M., Equilbey E., Gaudot I., Portal A., Lombard M., Ibba M., Maurice B., Wright R.** (2022) Gestion du risque affaissement-effondrement lié à la dissolution de gypse - Commune de Bargemon (Var). Rapport final. BRGM/RP-71427-FR.

**Marçot N.** (2017) Avis sur les préconisations de travaux du rapport ERG de 2012 concernant le fontis de St Avy (Rue Marcel Vandelli) au Pradet (83). Rapport BRGM/RP-66706-FR. 35 p., 18 ill., 1 ann.

**Portal A., François B., Jacob T.** (2019) Détection de cavités souterraines et caractérisation des formations gypseuses par microgravimétrie et méthode électrique dans le quartier Saint-Honorat, Le Luc en Provence (Var, 83). BRGM/RP-68614-FR, 113 p., 27 ill., tabl., 5 ann.

## **Annexe 1**

### **Photographie des carottes de sondage**



- BRGM1\_SC2022





- BRGM2\_SC2022





## **Annexe 2**

### **Sondages géologiques exploitables**



## Forage F1 à F5 (Etude Bercovici de 2007)

- Forage 1 : 100 mètres

### 1.1 Situation :

Au Nord du CD 559, et au nord-ouest du "puits Colombe" connu pour exploiter l'aquifère.

Positionné à la cote 27.

Intérêt : au Sud de la ligne la Four-Fonqueballe et quasiment à mi distance des deux captages.

### 1.2 Foration : $\phi$ 311 de 0 à 10 m, puis $\phi$ 204 de 10 à 100 m

\* La couverture alluviale, constituée par des argiles et des limons argileux, peu caillouteux, a une épaisseur de 9 m.

\* Au-dessous, après 1 m de calcaire noir, une forte épaisseur de calcaires et de calcaires argileux localement très fracturés, est mise en évidence de 10 à 80 m de profondeur.

D'importantes fissures sont détectées entre 26 et 45 m avec perte d'air totale

\* De 80 à 100 m le forage traverse une dolomie grise.

- Forage 2 : 80 mètres

### 2.2 Foration : $\phi$ 311 de 0 à 14 m, puis $\phi$ 204 de 14 à 150 m

\* La couverture alluviale est constituée par des argiles et des limons argileux, peu caillouteux, de 0 à 10 m, puis par une argile graveleuse de 10 à 12 m.

\* Au-dessous, après 1,90 m de calcaire noir, une forte épaisseur de marnes grises gypsifères est rencontrée, de 13,90 à 70 m de profondeur.

\* De 70 à 100 m la foration se fait à travers un calcaire marneux beige.

N.B. : Aucune venue d'eau n'étant apparue il est décidé de poursuivre le forage au-delà de 100 m.

Le calcaire marneux est reconnu jusqu'à 150 m.

- Forage 3 : 80 mètres

3.1 Situation :

Au Sud du CD 559, sur un replat schisteux du "massif du Pradet".  
Positionné à la cote 58.

Intérêt : rechercher les calcaires éventuels sous les schistes, au moins jusqu'à la cote - 20.

3.2 Foration :  $\phi$  311 de 0 à 12 m, puis  $\phi$  204 de 12 à 80 m

\* Jusqu'à 10 m de profondeur, la couverture est constituée par un sol argilo-caillouteux d'altération très micacé.

\* De 10 à 20 m on rencontre des schistes verts chloriteux très fracturés.

\* De 20 à 80 m le forage traverse des schistes sériciteux gris et bruns également très fracturés.

- Forage 4 : 80 mètres

4.1 Situation :

A l'Est de la commune, dans l'interfluve que constituent la Règue et son affluent amont rive gauche..

Positionné à la cote 41.

Intérêt : sur le revers oriental du massif du Pradet et dans une situation méridionale, éloignée des axes de communication.

4.2 Foration :  $\phi$  311 de 0 à 8 m, puis  $\phi$  204 de 8 à 80 m

\* De 0 à 13 m de profondeur la couverture est constituée par une argile caillouteuse rousse, puis de 13 à 15 m par des éboulis blocailleux.

\* De 15 à 30 m la foration se poursuit dans des calcaires très fracturés provoquant une perte d'air totale.

\* De 30 à 80 m le forage traverse une séquence essentiellement calcaire.

\* Deux passées d'argile sont mises en évidence entre 54 et 55 m puis entre 60 et 62 m.

- Forage 5 : 100 mètres

5.1 Situation :

Au Nord du CD 559, et au sud-ouest du captage de la Foux.  
Positionné à la cote 28.

Intérêt : Situation très occidentale, à l'extrémité périclinale de l'aquifère connu (fermeture de la "gouttière" vers l'Ouest).

5.2 Foration :  $\phi$  311 de 0 à 9 m,  $\phi$  204 de 9 à 30m,  $\phi$  155 de 30 à 100 m.

\* La couverture alluviale, constituée par des argiles et des limons argileux, faiblement graveleux, a une épaisseur de 10 m.

\* Au-dessous, après 2,50 m de marnes grises raides, une forte épaisseur d'argile plus ou moins graveleuse est mise en évidence de 12,50 à 35 m de profondeur.

\* De 35 à 45 m le forage recoupe une dolomie beige, très altérée.

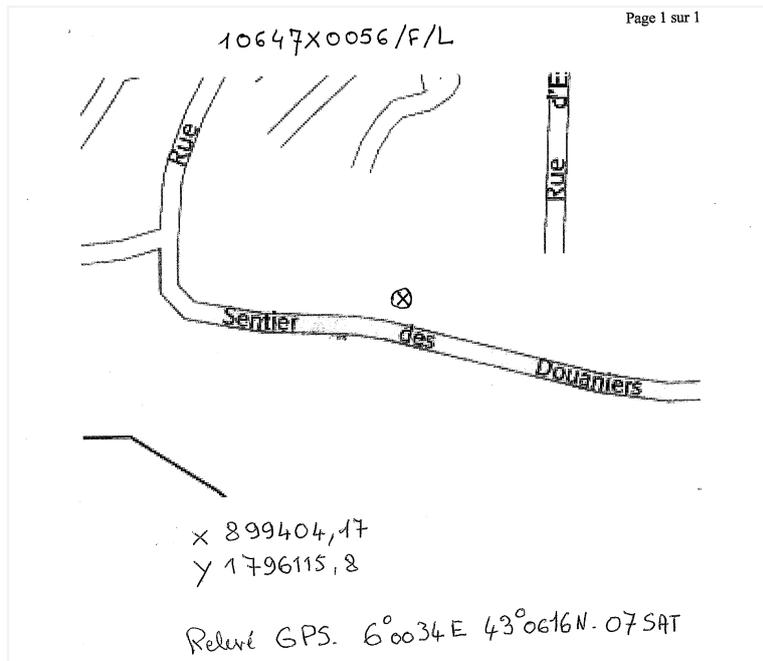
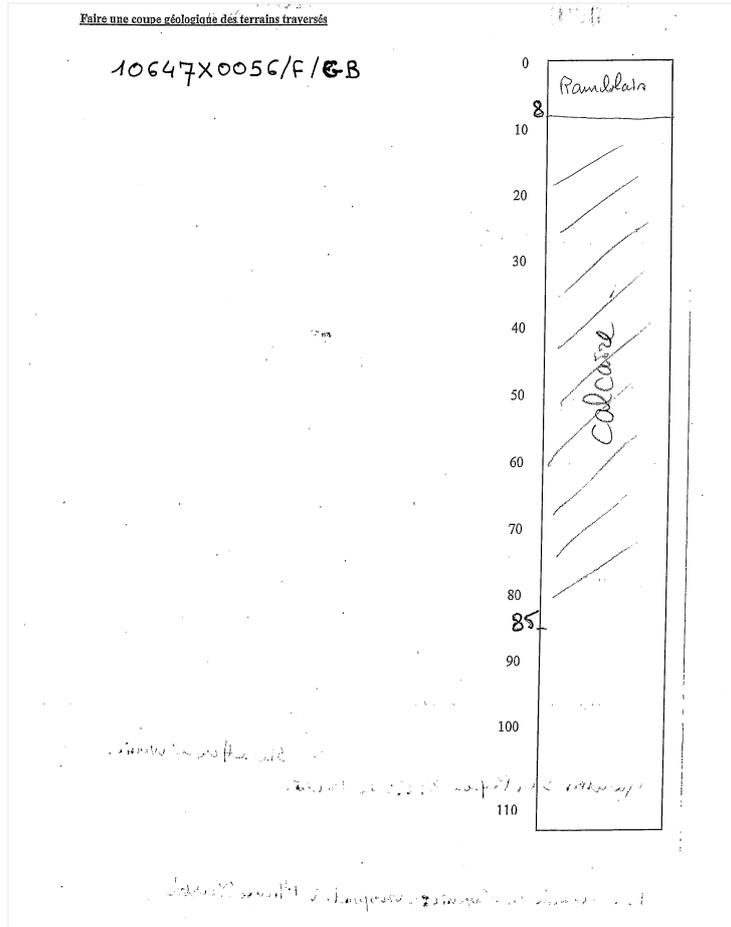
\* Après un passage d'argile grise, de 45 à 48 m, la foration se poursuit dans une alternance de calcaires beiges et gris, jusqu'à 100 m de profondeur.

5.3 Commentaire :

\* De 35 à 55 m, les calcaires sont fracturés à très fracturés.

\* La dolomie recoupée entre 35 et 45 m est très fortement des-structurée (débit sableux).

N.B. Le forage arrêté à 100 m reste dans les formations du Muschelkalk (Trias moyen).



## Sondages Géoterra

### SP2 :

- de 0,00 à 0,40 m : Remblai
- de 0,40 à 10,00 m : Argile limoneuse décomprimée à granules gypseuses
- de 10,00 à 25,00 m : Gypse gris à gris blanchâtre

### SPI :

- de 0,00 à 0,50 m : Remblai
- de 0,50 à 7,50 m : Argile limoneuse à granules gypseuses
- de 7,50 à 25,00 m : Gypse plus ou moins altéré gris

## Fontqueballe

. Foncqueballe :

2 forages et 3 puits :

Puits 1 : abandonné

Puits 2 : diamètre 355 mm (tube de garde)

Puits 3 : profondeur 24 m

Forage 1 : profondeur 24 m

Forage 2 : profondeur 47 m - Diamètre 400 mm

Forage en service : F2

Terrains traversés : Alluvions 0 - 3,6m  
Calcaires 3,6 - 32 m  
Sables 32 - 36 m  
Marnes rouge 36 - 43 m  
Cargneules 43 - 47 m

Débit moyen prélevé sur 24H : 30 à 40 l/sec. - Débit de pointe : 55 l/sec.

## La Foux

. La F O U X :

3 forages F1 (secours) F2 (abandonné) F3 en service

Diamètre : 365 mm - Profondeur : 40 m

Terrains traversés : Alluvions 0 - 3,5m  
Calcaires 3,5 - 12 m  
Dolomies et cargneules 12 - 35 m  
Grès

Débit moyen prélevé sur 24H : 20 à 25 l/sec. - Débit de pointe : 30 l/sec.

## BSS002LVBZ

Ancien code - avant 2017  
10644X0122/F

### Log géologique numérisé

Nombre de niveaux : 5

Profondeur	Lithologie	Stratigraphie
De 0 à 2 m	Terre	
De 2 à 3,5 m	Argiles	
De 3,5 à 4,5 m	Argiles greseux	
De 4,5 à 12 m	Gres	
De 12 à 50 m	Gres	

## **Annexe 3**

### **Géophysique (rapport de GEO2x)**



RÉFÉRENCE PROJET : 2022P22038

RECONNAISSANCES GÉOPHYSIQUES PAR SISMIQUE  
RÉFLEXION

LE PRADET (FRANCE)



RAPPORT FINAL

25 mai 2022



**GEO2X SA**

Rue de Chamblon 34  
1400 Yverdon-les-Bains  
Suisse  
info@geo2x.com  
www.geo2x.com



**BRGM**

3 Avenue Claude Guillemin  
45100 Orléans  
France



## Révisions

Status	Date	Rédaction	Relecture	Approbation
Draft	25 mai 2022	G. Cocchiararo	V. Metraux	D. Dupuy



## Table des matières

<b>1.</b>	<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>9</b>
<b>2.</b>	<b>OBJECTIFS DE L'ÉTUDE .....</b>	<b>10</b>
<b>3.</b>	<b>DÉROULEMENT DES OPÉRATIONS .....</b>	<b>11</b>
3.1.	Chronologie.....	11
3.2.	Conditions de terrain.....	11
<b>4.</b>	<b>HSE.....</b>	<b>12</b>
<b>5.</b>	<b>TOPOGRAPHIE .....</b>	<b>15</b>
5.1.	Système de coordonnées .....	15
5.2.	Ressources .....	15
5.2.1	Équipement.....	15
5.3.	Paramètres et procédure d'acquisition.....	15
5.4.	Contrôle de qualité et traitement des données.....	15
5.5.	Résultats .....	16
<b>6.</b>	<b>SISMIQUE RÉFLEXION .....</b>	<b>20</b>
6.1.	Objectifs de l'acquisition.....	20
6.2.	Ressources .....	20
6.2.1	Équipement.....	20
6.2.2	Personnel .....	21
6.3.	Paramètres d'acquisition .....	21
6.4.	Contrôle de qualité.....	21
6.4.1	Choix des paramètres .....	21
6.4.2	Logiciels.....	21
6.4.3	Qualité des données brutes .....	21
6.5.	Traitement des données .....	23
<b>7.</b>	<b>RÉSULTATS .....</b>	<b>26</b>



## Liste des figures

Figure 1: Situation générale de la zone d'étude .....	9
Figure 2: Pose des géophones .....	12
Figure 3: Mesures topographiques5 .....	16
Figure 4: Position des géophones .....	17
Figure 5: Position des points sources.....	18
Figure 6 : Camion vibreur Envirovibe IVI Mark II sur le point de tir .....	20
Figure 7: Tir effectué au minivib .....	22
Figure 8: Zoom sur le tir de Figure 7 .....	22
Figure 9: Exemple de position des midpoints et numérotation CDP .....	23
Figure 10: Exemple vérification de la géométrie .....	24
Figure 11: Exemple de la construction du modèle de vitesses.....	24
Figure 12: Tir sur le profil P03 .....	26
Figure 13: Section sismique P01 .....	27
Figure 14: Section sismique P02 .....	28
Figure 15: Section sismique P03 .....	29
Figure 16: Section sismique P04 .....	30
Figure 17: Section sismique P05 .....	31
Figure 18: Section sismique P01 .....	32
Figure 19: Section sismique P02 .....	33
Figure 20: Section sismique P03 .....	34
Figure 21: Section sismique P04 .....	35
Figure 22: Section sismique P05 .....	36

## Liste des tables

Table 1: Quantitatifs par ligne .....	10
Table 2: Résumé des opérations .....	11
Table 3: Synthèse des positions des lignes (coordonnées Lambert 93) .....	16
Table 4: Paramètres d'acquisition. ....	21
Table 5: Spécifications Trimble R10. ....	I
Table 6: Spécifications Trimble S05. ....	III

# Partie I : Résumé des opérations



## 1. INTRODUCTION

Ce rapport présente la campagne de reconnaissances géophysiques par sismique réflexion effectuée en mai 2022 par le bureau Geo2X SA à la demande du BRGM.

L'acquisition de ces nouveaux profils doit, à terme, permettre de préciser les rapports structuraux des différentes unités géologiques qui caractérisent la région.

La figure ci-dessous présente la situation générale des profils.

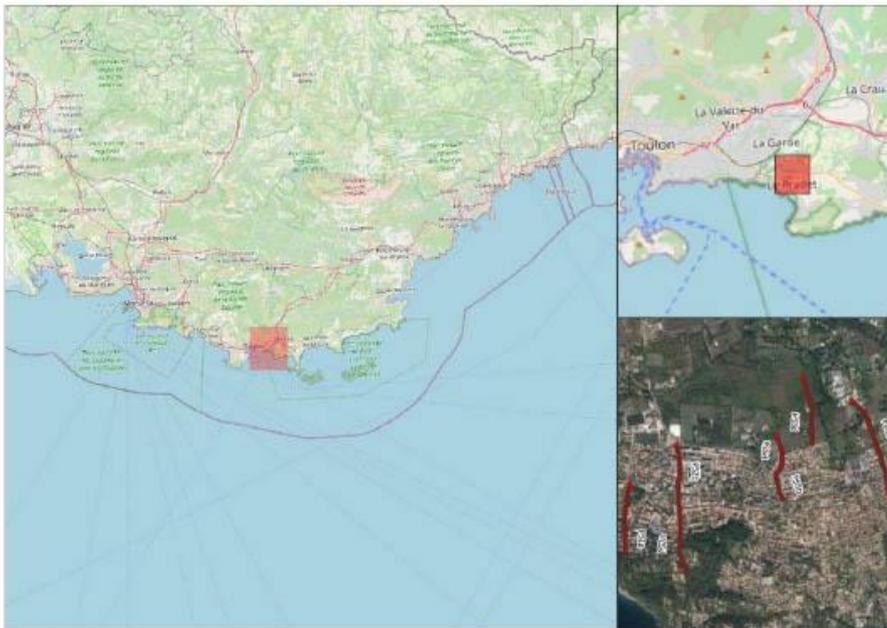


Figure 1: Situation générale de la zone d'étude

La Table 1, en page suivante, résume les quantitatifs acquis.

Table 1: Quantitatifs par ligne

Ligne	Géophones	Sources	Longueur
PS1	96	48	475
PS2	176	88	875
PS3	148	74	735
PS4	96	48	475
PSS	93	47	460
<b>Total</b>	<b>609</b>	<b>305</b>	<b>3020m</b>

Ce rapport regroupe les résultats obtenus pour cette étude ainsi que les spécifications techniques nécessaires à sa réalisation.

- La partie I fournit des informations sur le déroulement des opérations ;
- La partie II détaille les ressources, paramètres et procédures de traitement de données pour chacune des méthodes employées ;
- La partie III présente l'ensemble des résultats. Des recommandations pour de futures études sont également fournies ;
- Les annexes regroupent l'ensemble des cartes nécessaires à cette étude ainsi que les spécifications techniques de l'équipement employé.

## 2. OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

Cette campagne de sismique réflexion, à l'Est de la ville de Toulon dans la commune du Pradet, a pour but de préciser la géologie du sous-sol et une amélioration de la résolution verticale et horizontale du modèle géologique.

Un système de failles recoupe le cœur de la zone à investiguer en direction environ O-E, et son existence/position est à préciser à l'aide de l'acquisition de cinq profils de sismique réflexion.

### 3. DÉROULEMENT DES OPÉRATIONS

#### 3.1. Chronologie

Le tableau ci-dessous résume le déroulement des opérations, du lancement du permittage à la démobilisation.

Table 2: Résumé des opérations

Date	Réalisation
<b>Avant 09.05</b>	Préparation de l'implantation, design des lignes Préparation et mobilisation de l'équipement Préparation et impression des supports de communications DT/DICT, arrêté de voirie (BRGM)
<b>Lundi 09.05</b>	Mobilisation du personnel et de l'équipement de mesure
<b>Mardi 10.05</b>	Déploiement des profils 2, 4 et 5
<b>Nuit entre mardi 10 et mercredi 11</b>	Tirs sur les 3 profils déployés la journée
<b>Mercredi 11.05</b>	Ramassage des profils 2, 4 et 5 et déploiement des profils 1 et 3
<b>Nuit entre mercredi 11 et jeudi 12</b>	Tirs sur les profils 1 et 3
<b>Jeudi 12.05</b>	Ramassage des profils 1 et 3-démobilisation

#### 3.2. Conditions de terrain

L'ensemble de l'acquisition, incluant les mesures topographiques, s'est déroulée dans des conditions météorologiques très bonnes. Le planning prévisionnel de la vibrosismique a pu être respecté. Les lignes sismiques traversaient surtout zones urbaines c'est pour cela que la phase de tirs s'est déroulée de nuit.

## 4. HSE

Au vu des risques spécifiques identifiés dans le cadre de ces acquisitions au moyen de gros engins, un système de HSE adapté a été mis en place. Afin de minimiser les dangers rencontrés et l'impact du travail sur les riverains et l'environnement, les éléments suivants ont été mis en place :

- Une réunion générale de lancement de mission expliquant à chacun :
  - Les buts et enjeux des acquisitions ;
  - Les risques spécifiques au projet et la façon de s'en prémunir ;
  - Les règles de comportements avec les riverains.
- Des réunions quotidiennes avec les équipes de lignes et de tirs. Ces réunions visaient à rappeler chaque jour les règles de sécurité ainsi que des ajustements dans la façon de travailler pour donner suite à des rapports d'anomalie. Parmi les sujets abordés :
  - Pose de géophone au bord des trottoirs et sécurisation des capteurs ;
  - Signalement des géophones sur les passages piétons, cyclables ;
  - Gestion des déchets ;
  - Postures de travail, PPE ;
  - Signalétique autour des vibrateurs ;
  - Distances de sécurités du personnel autour des vibrateurs.
- Un système de remontée d'information du terrain en direction du management via des fiches d'anomalie et une application pour smartphone.

Le respect des normes de travail définie et la bonne collaboration entre les différents collaborateurs de cette mission a permis d'éviter tout incident majeur.



Figure 2: Pose des géophones

## Partie 2 : Technique



## 5. TOPOGRAPHIE

### 5.1. Système de coordonnées

L'ensemble des résultats cartographiques et géophysiques de cette étude sont fournis dans le système de coordonnées Lambert 93 (EPSG 2154).

### 5.2. Ressources

#### 5.2.1 Equipement

Le suivi topographique de l'acquisition sismique a été assuré à l'aide de deux systèmes DGPS distincts :

- Un DGPS Trimble R10, assurant une précision des mesures à 10cm ;
- Un théodolite robotisé Trimble S05, assurant une précision des mesures à 1cm sur les zones où la couverture GPS était trop faible.

Les spécifications techniques détaillées de chacun de ces équipements sont fournies en annexe I.

### 5.3. Paramètres et procédure d'acquisition

La plupart des géophones et tirs ont été positionnés au GPS différentiel. Les paramètres de mesures suivants ont été employés :

- Mode d'observation : RTK
- Observations : 5, moyennées
- Masque d'élévation : 5°
- Satellites : Minimum 8 (GPS & GLONASS)

L'ensemble des points traversant la zone de forêt ont été implantés préalablement à la pose des géophones et la réalisation des forages pour l'explosif. Le marquage au sol de ces points préparés sur un système SIG permet aux équipes de pose et de tirs de positionner les instruments. Dans les zones découvertes la position des géophones et des tirs a été mesurée après l'installation des capteurs.

### 5.4. Contrôle de qualité et traitement des données

Les données sont exportées des instruments en tant que fichiers texte. A la fin de chaque journée d'acquisition, l'ensemble des données est sauvegardé sur le serveur de Geo2X SA tout en étant copié pour traitement sur un ordinateur portable.

L'ensemble du traitement de données et du contrôle de qualité est effectuée dans des feuilles de calculs Microsoft Excel et dans un projet QGIS employant les données fournies par l'IGN.

Le contrôle de qualité et le traitement des données a été assuré chaque jour afin de fournir des données adéquates au traitement des données sismiques.

●●●●●

SISMIQUE

LE

PRADET

/  
15

Afin de s'assurer de la cohérence des données, des points de contrôles ont été repris chaque jour. La procédure de contrôle de qualité inclus :

- Calcul des distances entre points et comparaison avec l'implantation théorique du profil ;
- Contrôle de la cohérence des coordonnées X/Y dans un SIG (imagerie aérienne & cadastre) ;
- Contrôle visuel d'un profil altimétrique.

### 5.5. Résultats

Les cartes en page suivante présentent les points relevés sur les 5 profils.

Le tableau ci-dessous résume les positions des lignes.

Table 3: Synthèse des positions des lignes (coordonnées Lambert 93)

Ligne	X <sub>Start</sub> [m]	Y <sub>Start</sub> [m]	X <sub>End</sub> [m]	Y <sub>End</sub> [m]
PS1	945298.7	6227441	945335.3	6227906
PS2	945721	6227300	945654	6228179
PS3	947103.2	6227811	946836.5	6228480
PS4	946568.4	6228187.5	946501.9	6228651.7
PS5	946374.8	6227804.6	946325.4	6228237.8



Figure 3: Mesures topographiques5

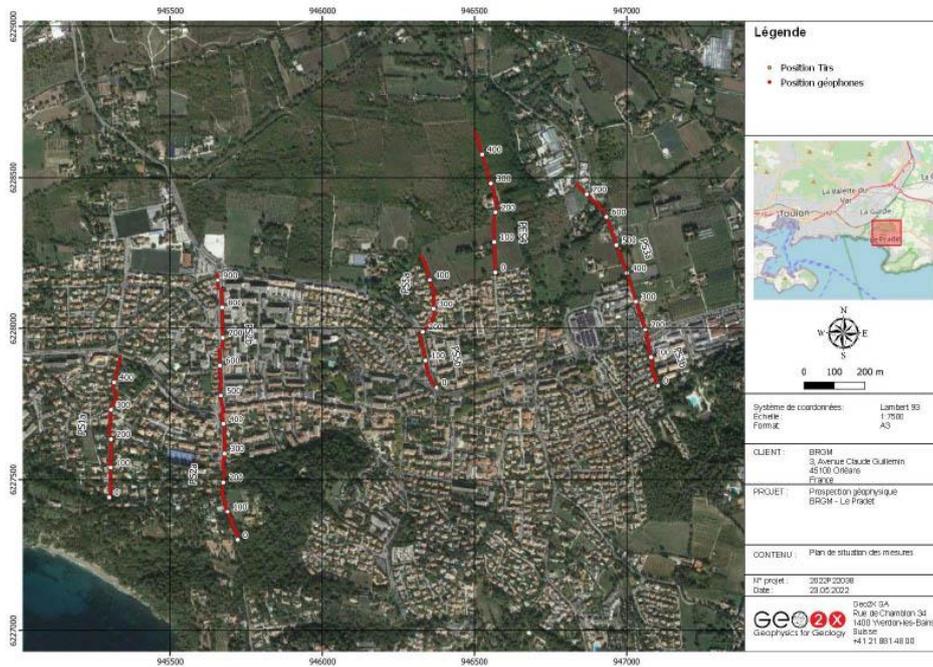


Figure 4: Position des géophones

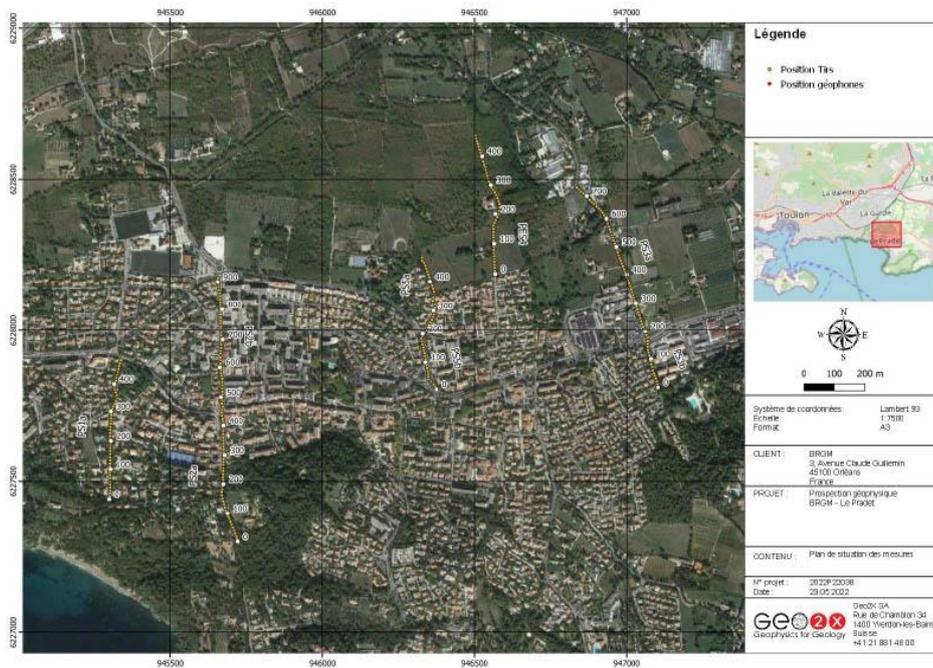
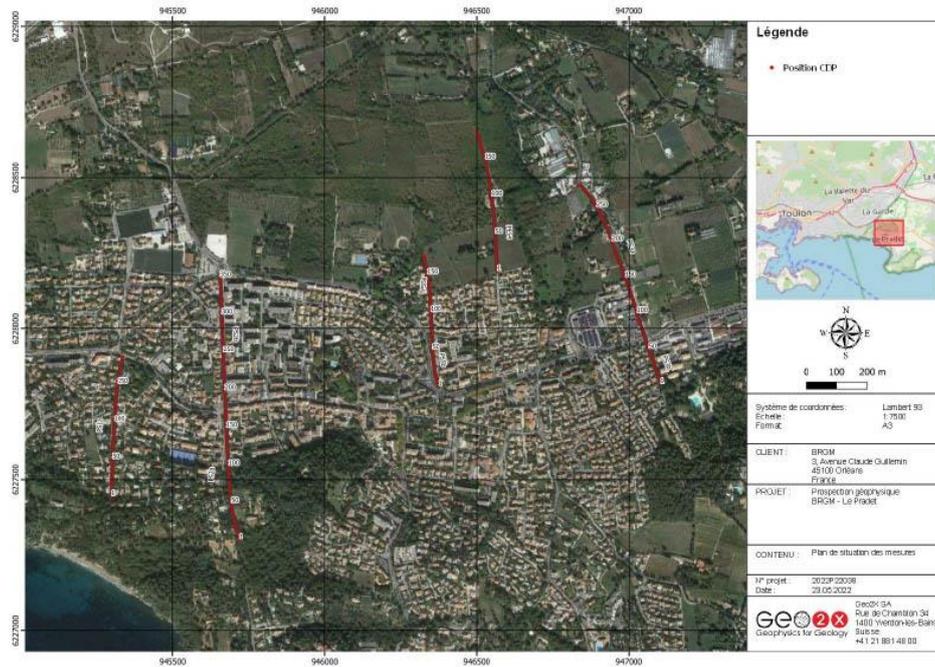


Figure 5: Position des points sources



## 6. SISMIQUE RÉFLEXION

### 6.1. Objectifs de l'acquisition

L'acquisition des 5 profils de sismique réflexion dans l'agglomération du Pradet vise à :

- Caractériser la géométrie des réflecteurs ;
- Préciser le positionnement d'accidents tectoniques en situant les plans de failles principaux ;
- Evaluer les décalages verticaux créés par ces failles.

Une source vibrante a été employée afin d'acquérir les données sismiques.

### 6.2. Ressources

#### 6.2.1 Equipement

##### 6.2.1.1 Vibrateur

La source vibrante employée, un Envirovibe IVI Mark II, déploie un *peak force* de 14940 livres ce qui le rend à même de travailler en environnement urbain ou péri-urbain tout en garantissant une profondeur d'investigation suffisante pour les objectifs requis.



Figure 6 : Camion vibreur Envirovibe IVI Mark II sur le point de tir

Les spécifications détaillées de ce vibreur sont fournies en annexe II.

### 6.2.1.2 Sismographe

Cette acquisition a été effectuée à l'aide d'un sismographe SmartSolo (DTCC) avec un maximum de 176 canaux actifs (profil 2). Les spécifications de ce sismographe sont précisées en annexe III.

Ce système sans fil permet de s'affranchir de tous les problèmes liés au passage de câbles, traversées de routes, carrefours, etc.

### 6.2.2 Personnel

Le personnel en charge de l'acquisition vibrosismique était composé de :

- Giuseppe Cocchiararo, chef de projet ;
- Valentin Métraux, observateur ;
- Mathieu Beck, HSE-topographie ;
- Chloé Nicaty, responsable ligne ;
- Matteo Menichelli, vib push ;
- Valentin Dutoit ; chauffeur minivib.

## 6.3. Paramètres d'acquisition

Les paramètres d'acquisition utilisés lors de cette campagne de sismique sont récapitulés dans le tableau en page suivante.

Table 4: Paramètres d'acquisition.

<b>Intertrace</b>	5 mètres	<b>Géophones</b>	5Hz single vertical high sensitivity
<b>Intertir</b>	10 mètres	<b>Sources</b>	Envirovibe IVI Mark II et explosifs
<b>Traces</b>	P1 : 538 P2 : 85	<b>Spécifications de la source</b>	V1: 10-100Hz, 30s
<b>Temps d'écoute</b>	2s	<b>Echantillonnage</b>	1ms
<b>Format des données</b>	SegY		

## 6.4. Contrôle de qualité

### 6.4.1 Choix des paramètres

Les paramètres d'acquisition ont été suggérés par le client.

### 6.4.2 Logiciels

L'extraction des points de tirs se fait à partir des données brutes enregistrées en continu par les IGU SmartSolo et des T<sub>0</sub> GPS enregistrés lors du déclenchement de chaque sweep.

Le contrôle qualité et le traitement des données de vibrosismique ont été effectués à l'aide du logiciel ProMax (Halliburton).

### 6.4.3 Qualité des données brutes

La cohérence du T<sub>0</sub> est bonne sur tous les tirs. La procédure logicielle d'extraction des points de tirs a permis de collecter 100% des données. Aucune trace n'a été perdue.

La qualité générale des données est globalement satisfaisante (voir ci-dessous). Cependant, le travail en bord de route et en milieu péri-urbain impacte parfois la qualité des données.

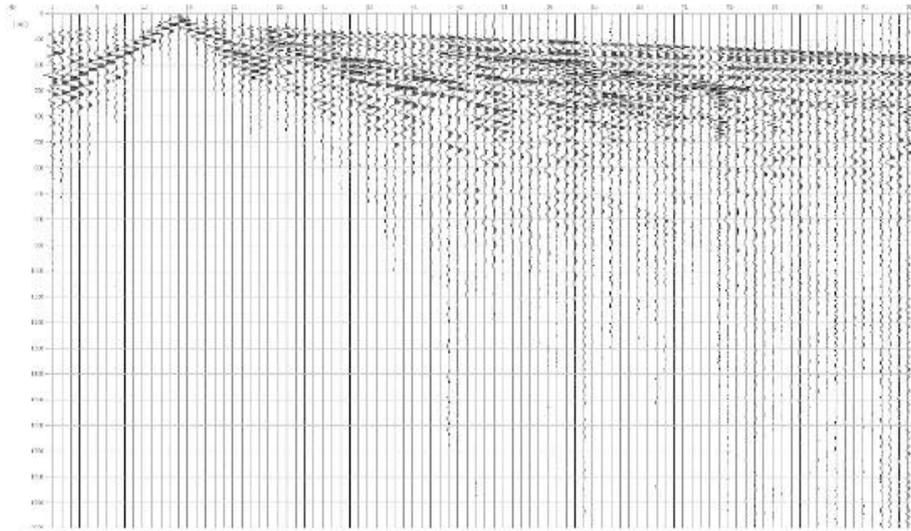


Figure 7: Tir effectué au minivib

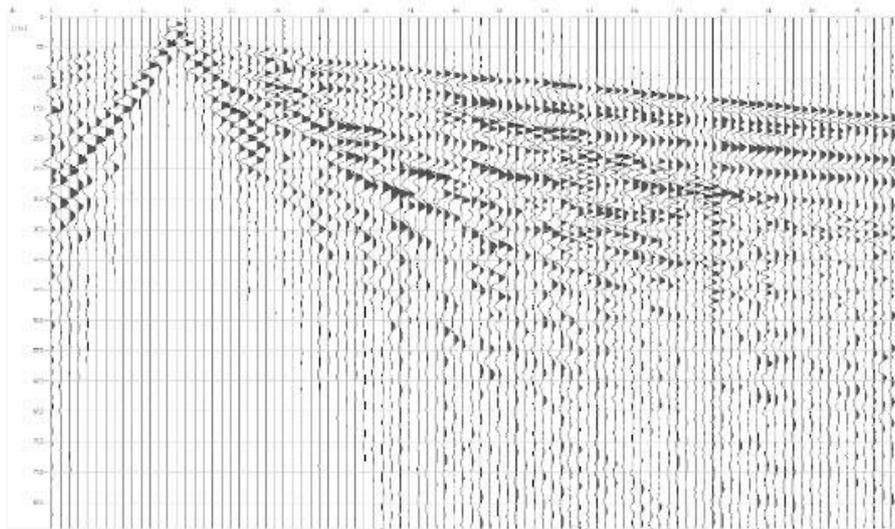


Figure 8: Zoom sur le tir de Figure 7

## 6.5. Traitement des données

La chaîne de traitement ci-dessous a été employée pour toutes les lignes de vibrosismique afin de produire des sections de qualité optimales. L'ensemble de la procédure a été effectuée dans le logiciel ProMax (Halliburton).

La chaîne de traitement ci-dessous a été appliquée sur toutes les lignes :

- Préparation des points de tirs :
  - Import des SEG-Y et mise en place de la géométrie
  - Déconvolution (Minimum phase, 80ms)
  - Gain (Automatic Gain Control, 500ms)
  - Statiques réfractions (datum 50m.a.s.l., vitesse de remplacement 2800 m/s)
  - Atténuation des ondes de surface
  - Statiques résiduelles
  - Normal Moveout
  - CDP ensemble stack
  - Surface wave noise attenuation
  - Bandpass filter (16-24 ; 80-100)
  - Coherency filter
  - Phase shift migration
  - Trace header math
  - Trace sample math
  - Header statics
  - Trace math
  - Time/Depth conversion
  - Segy output

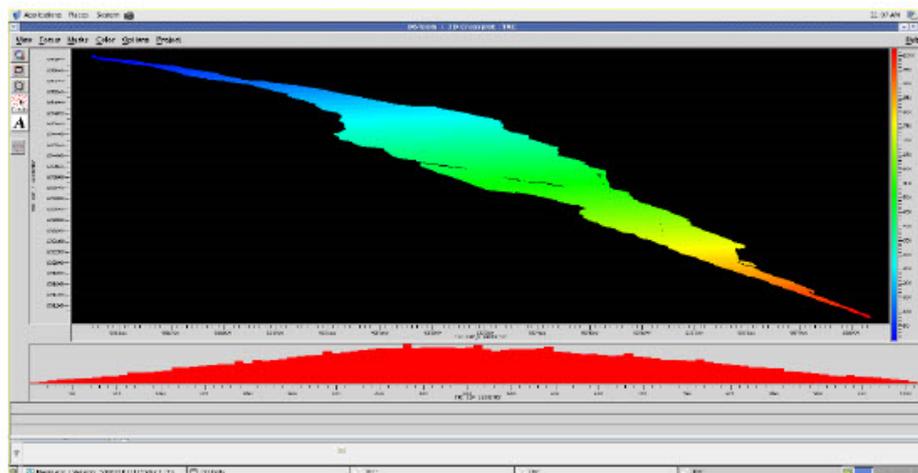


Figure 9: Exemple de position des midpoints et numérotation CDP

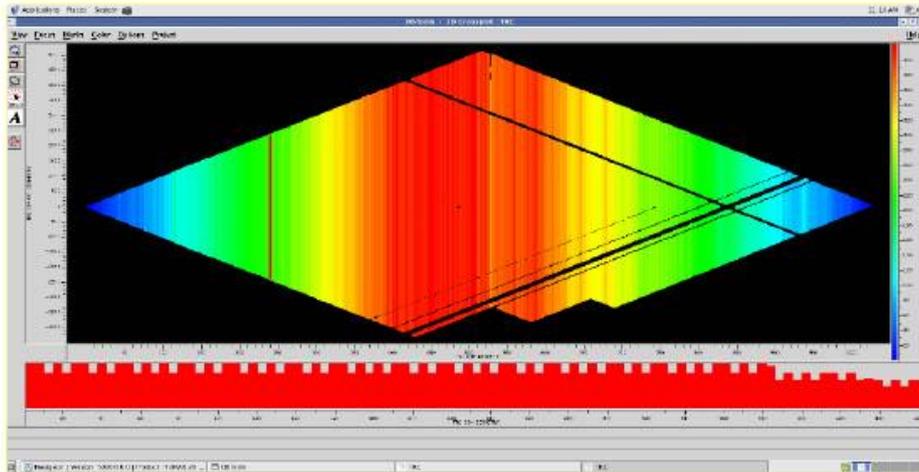


Figure 10: Exemple vérification de la géométrie

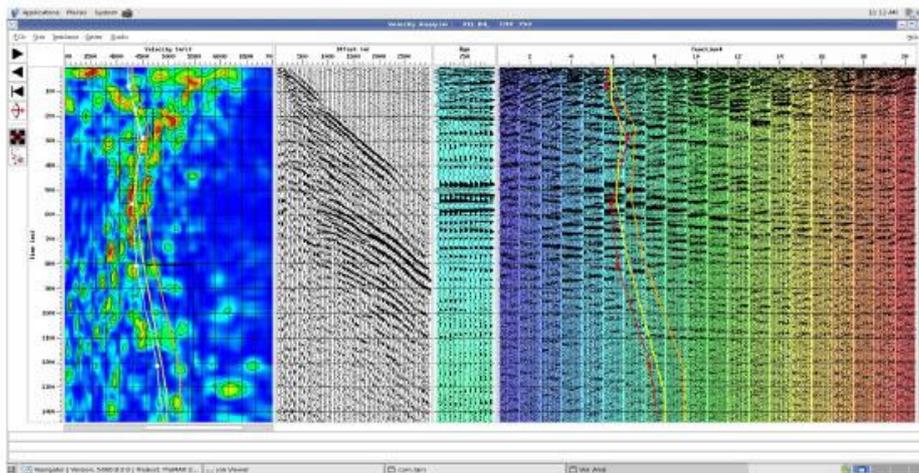


Figure 11: Exemple de la construction du modèle de vitesses

# Partie 3: Résultats

## 7. RÉSULTATS

L'acquisition de 5 profils de sismique réflexion a été effectuée durant la campagne conduite au mois de mai 2022. Un total d'environ 3'000 mètres de sismique a été acquis.

Les données ont été traitées en sismique réflexion afin de caractériser la géométrie des éléments structuraux de la zone d'étude.

Quatre sections pour chaque profil sont présentées en annexe, stack temps et profondeur et migration temps et profondeur.

Une série de réflecteurs plus ou moins continus sont visibles sur les premiers 200m de profondeur sur chaque section, ces réflecteurs sont interrompus et déplacés vraisemblablement par des éléments tectoniques.

Des réflecteurs moins continus sur la longueur de la section sont visibles à profondeurs majeures.

Un phénomène de back scattering est bien visible sur le profil P03 (voir image ci-dessous).

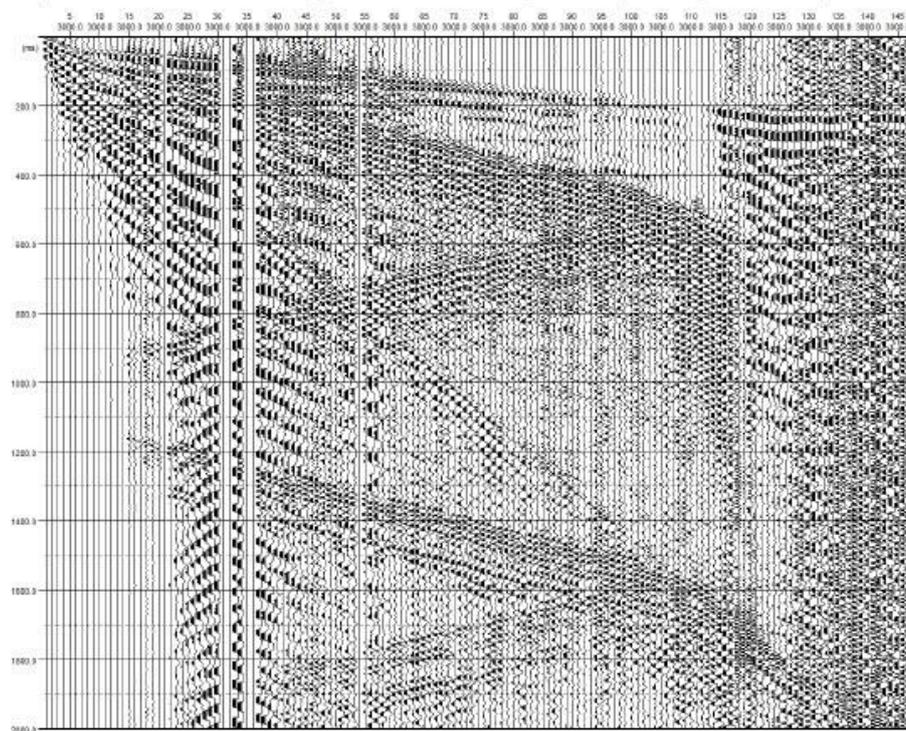


Figure 12: Tir sur le profil P03

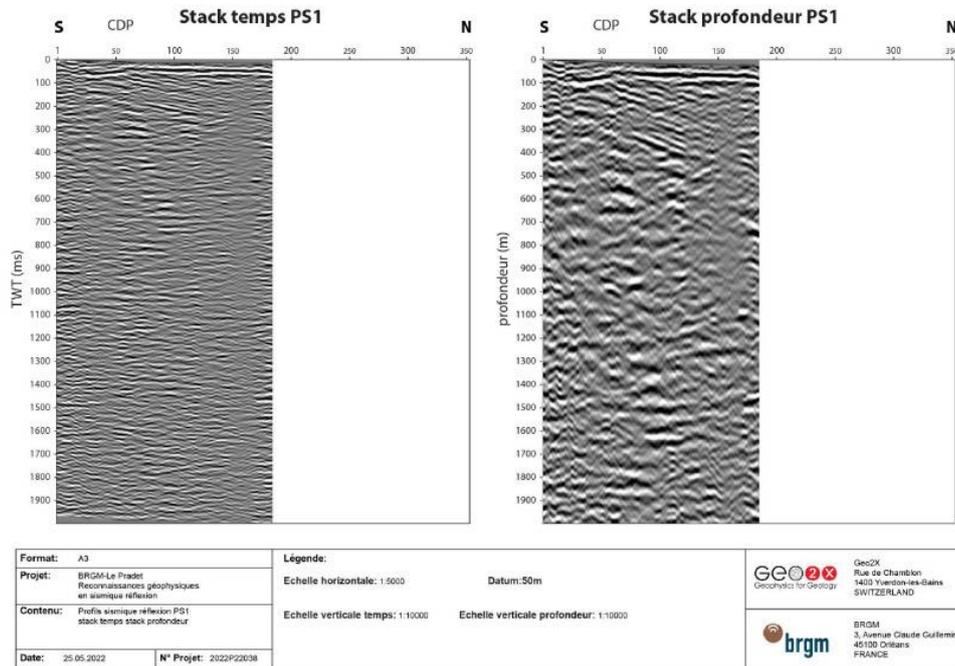


Figure 13: Section sismique P01

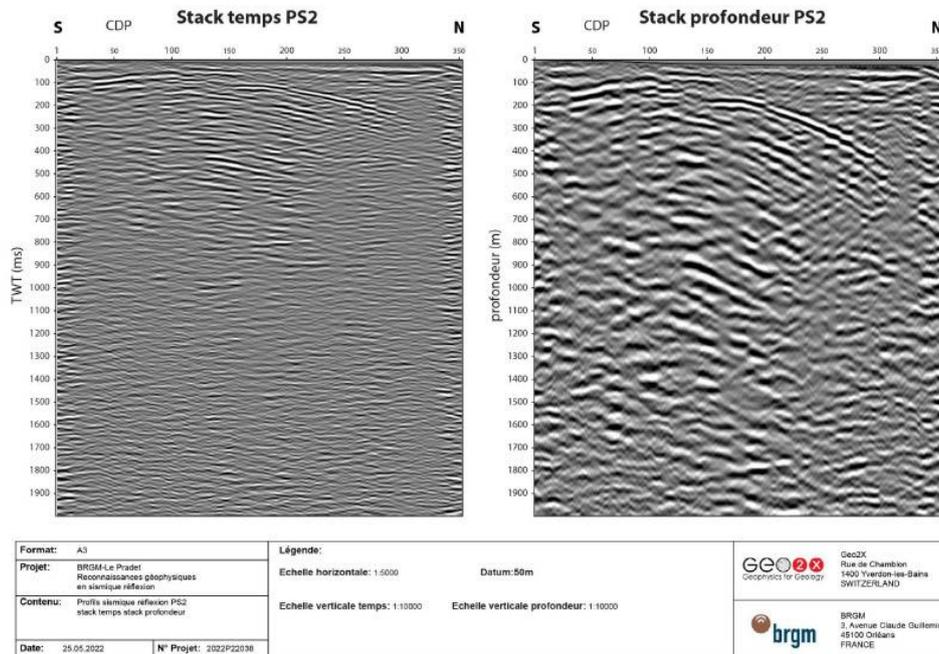


Figure 14: Section sismique P02

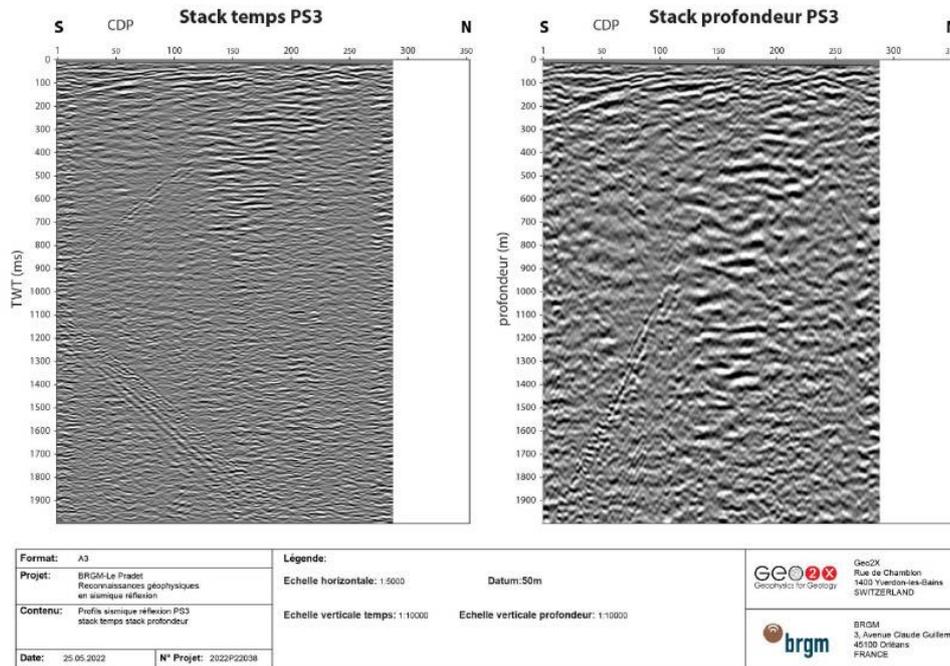


Figure 15: Section sismique P03

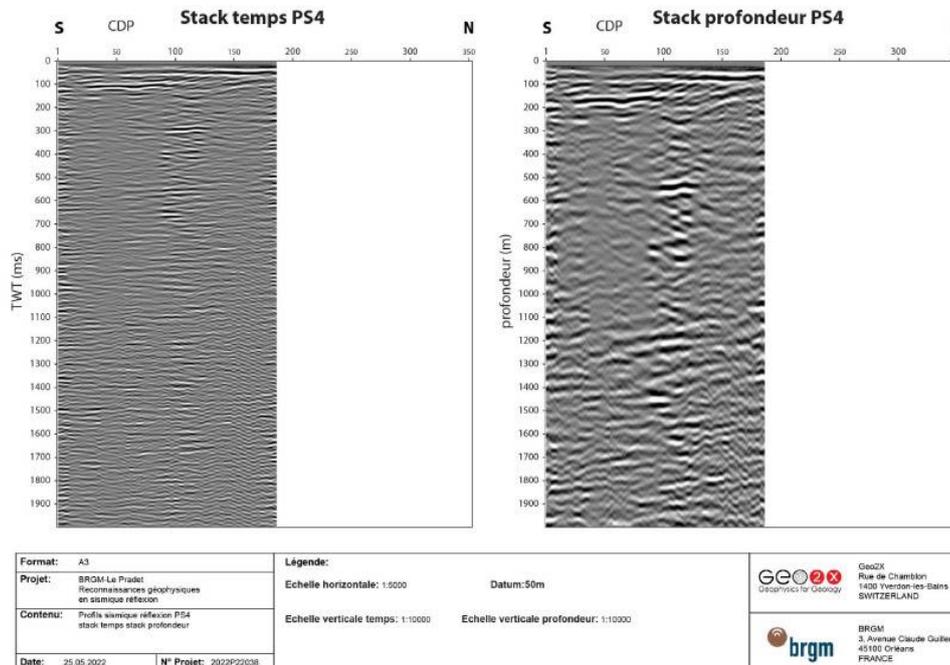


Figure 16: Section sismique P04

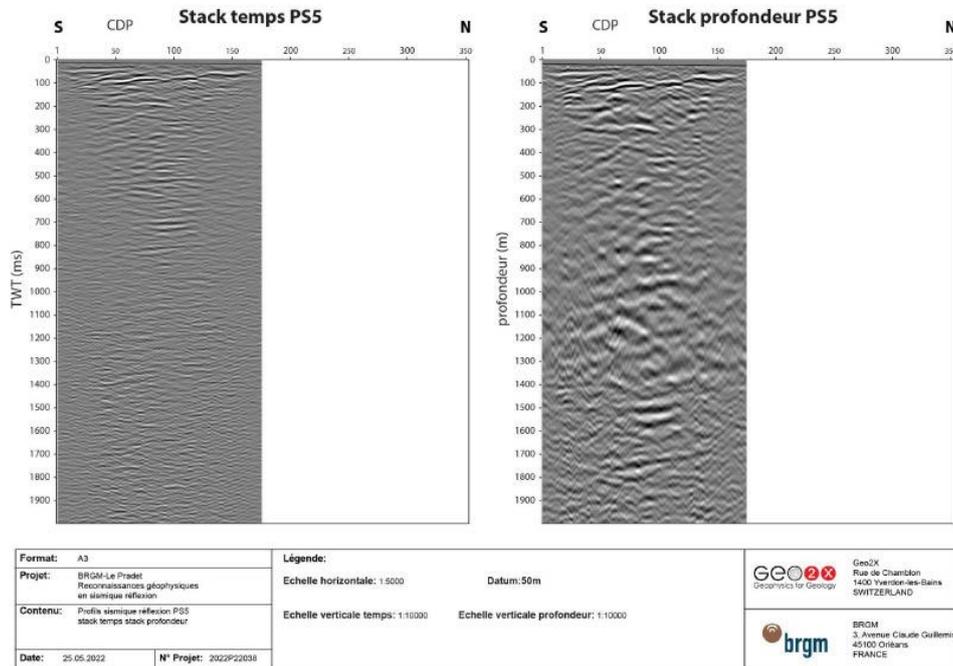


Figure 17: Section sismique P05

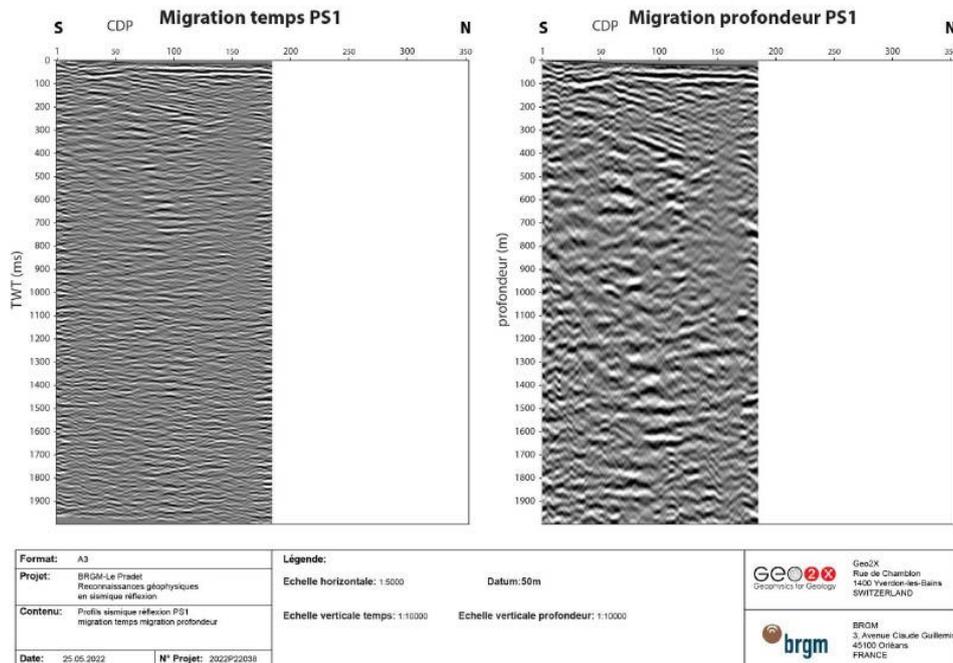


Figure 18: Section sismique P01

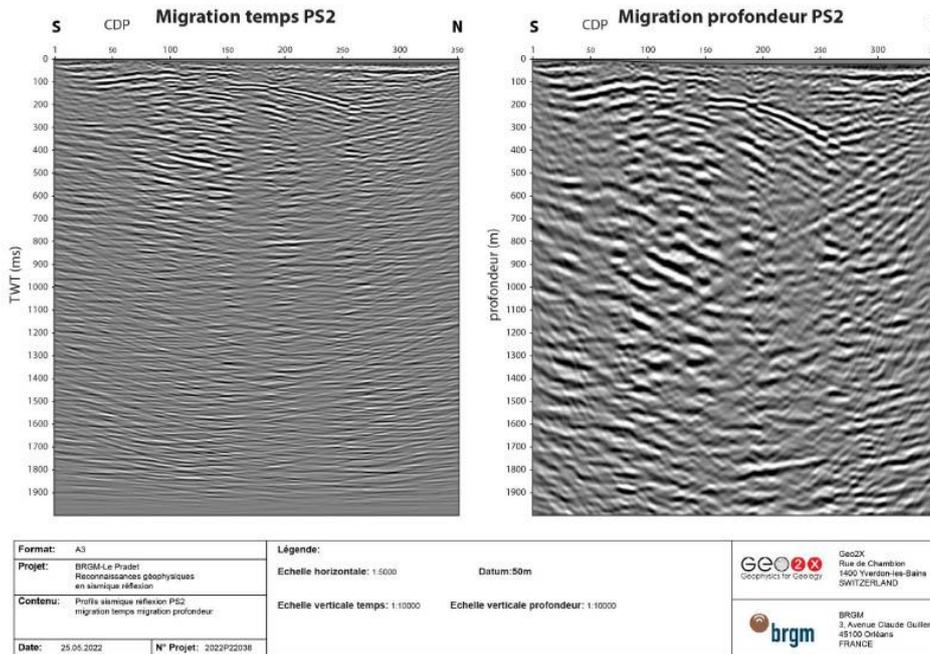


Figure 19: Section sismique P02

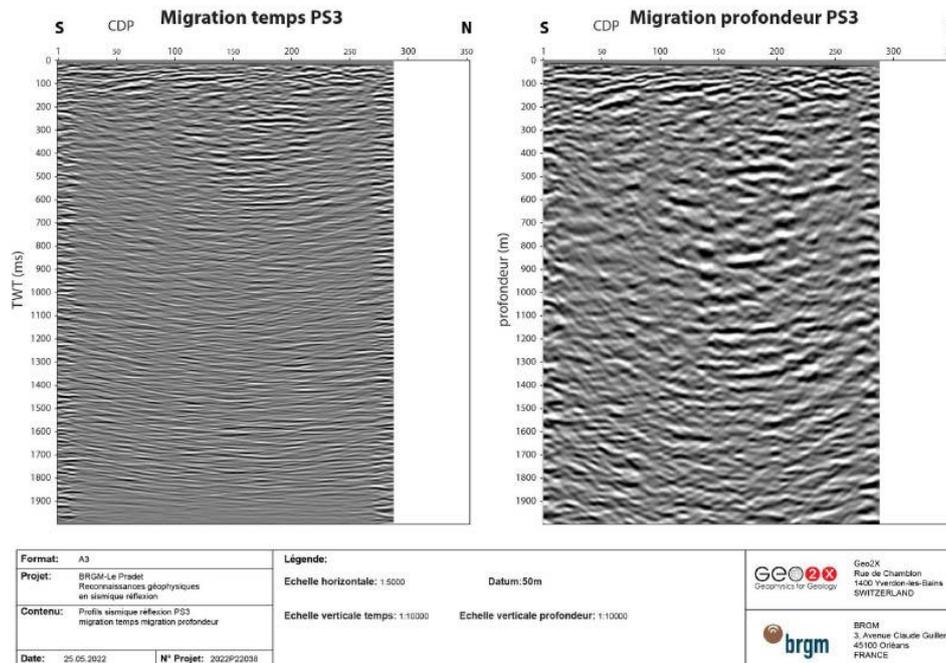


Figure 20: Section sismique P03

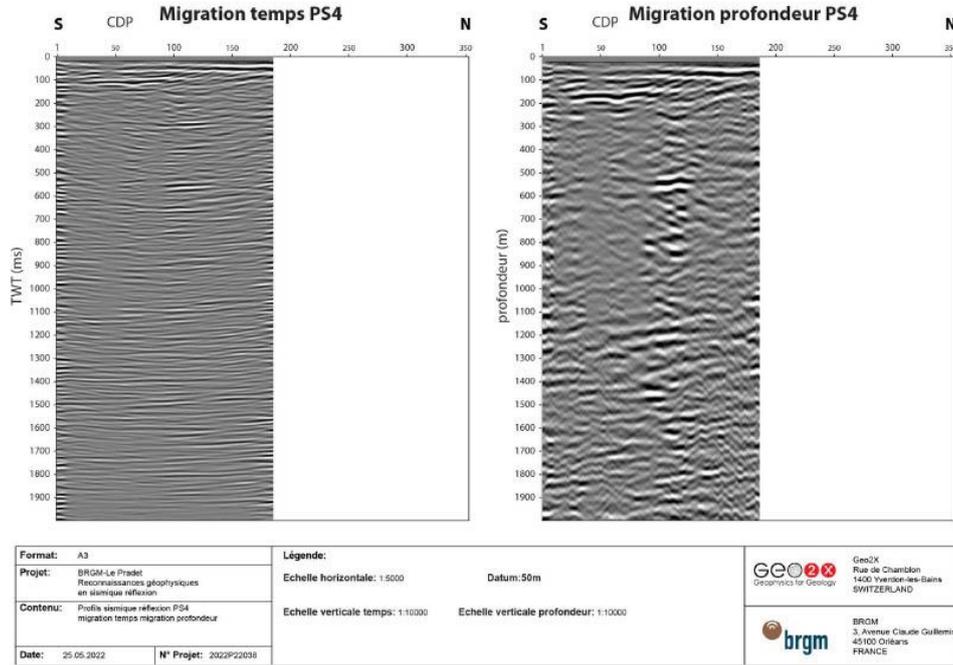


Figure 21: Section sismique P04

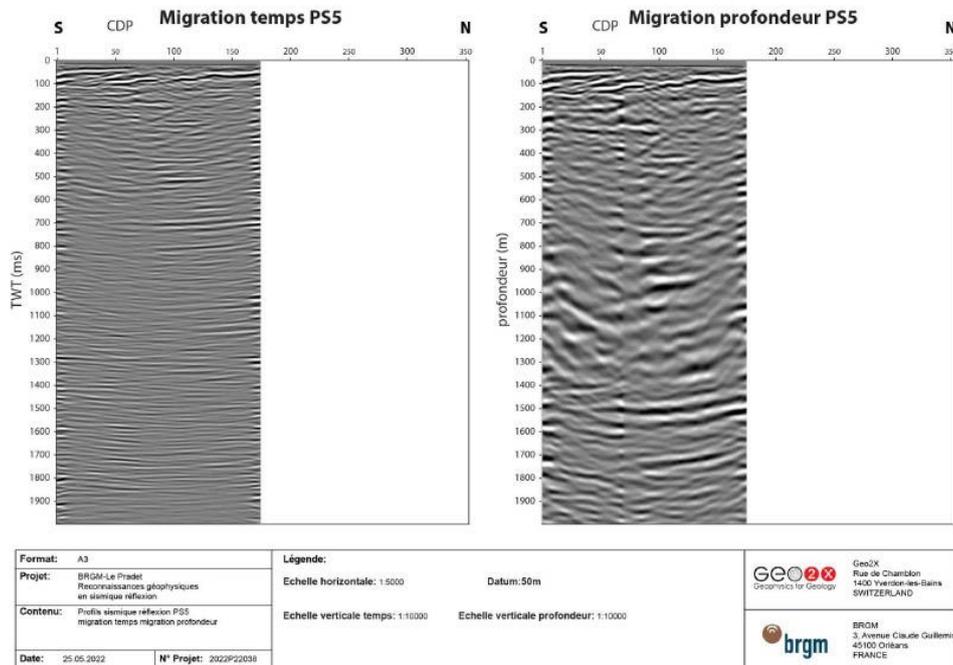


Figure 22: Section sismique P05

# Annexes

## I. Spécifications de l'équipement topographique

Table 5: Spécifications Trimble R10.

SPECIFICATIONS DES PERFORMANCES		
<b>MESURES</b>		
	<p>Des points de mesure plus tôt et plus vite avec la technologie Trimble HD-GNSS</p> <p>Productivité et traçabilité des mesures améliorées avec le niveau électronique et la compensation d'inclinaison fournis par Trimble SurePoint</p> <p>Une localisation au centimètre près dans le monde entier grâce aux services de correction par satellite Trimble CenterPoint RTX ou par Internet</p> <p>Réduction des temps d'immobilisation dus à la perte du signal radio, grâce à la technologie Trimble xFill</p> <p>Processeur Trimble Custom Survey GNSS avancé à 672 canaux</p> <p>Pérennisez votre investissement avec la suite GNSS Trimble 360</p> <p>Signaux satellites suivis simultanément:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>GPS : L1C/A, L2C, L2E, L5</li> <li>GLONASS : L1C/A, L1P, L2C/A, L2P, L3</li> <li>SBAS : L1D/A, L5 (pour les satellites SBAS prenant en charge les signaux L5)</li> <li>Galileo : E1, E5A, E5B, E5, ARBOC, E6</li> <li>BeiDou : B1, B2, B3</li> <li>QZSS : L1C/A, L1 SAIF, L1C, L2C, L5</li> <li>NaviC (IRNSS) : L5</li> </ul> <p>Services de correction CenterPoint RTX, OmniSTAR<sup>®</sup> HP, XP, G2, VBS</p> <p>WAAS, EGNOSS, GAGAN, MSAS</p> <p>Suivi fiable dans des environnements difficiles grâce à un amplificateur LNA (Low Noise Amplifier) avancé avec un gain de signal de 30 dB pour réduire les effets de suivi du signal causés par les émetteurs hors bande à haute puissance</p> <p>Un filtrage supplémentaire de l'iridium au-dessus de 1015 MHz permet d'utiliser l'antenne à 20 m de l'émetteur Iridium</p> <p>Un filtrage (accusés supplémentaire en dessous de 1510 MHz) permet d'utiliser l'antenne à 100 m de la tour de téléphonie japonaise LTE</p> <p>Techniques de traitement de signal numérique (DSP) pour détecter et récupérer des signaux GNSS usurpés</p> <p>Algorithme de surveillance de l'intégrité autonome du récepteur (RAM) pour détecter et rejeter les mesures satellites problématiques afin d'améliorer la qualité de la position</p> <p>Protection améliorée contre les données géométriques erronées</p> <p>Taux de positionnement</p>	<p>1 Hz, 2 Hz, 5 Hz, 10 Hz et 20 Hz</p>
<b>POSITIONNEMENT<sup>1</sup></b>		
<b>POSITIONNEMENT CODE GNSS DIFFÉRENTIEL</b>		
	Horizontal	0,25 m + 1 ppm RMS
	Vertical	0,50 m + 1 ppm RMS
	Precision de localisation différentielle SBAS <sup>2</sup>	habituellement < 5 m 3DRMS
<b>ARPENTAGE GNSS STATIQUE</b>		
<b>Statique de haute précision</b>		
	Horizontal	3 mm + 0,1 ppm RMS
	Vertical	3,0 mm + 0,4 ppm RMS
<b>Statique et Statique rapide</b>		
	Horizontal	3 mm + 0,5 ppm RMS
	Vertical	5 mm + 0,5 ppm RMS
<b>ARPENTAGE CINÉMATIQUE EN TEMPS RÉEL (RTK)</b>		
<b>Ligne de base unique &lt; 30 kms</b>		
	Horizontal	8 mm + 1 ppm RMS
	Vertical	25 mm + 1 ppm RMS
<b>Network RTK<sup>4</sup></b>		
	Horizontal	8 mm + 0,5 ppm RMS
	Vertical	25 mm + 0,5 ppm RMS
<b>Temps de démarrage RTK pour les précisions spécifiées<sup>4</sup></b>		
<b>TECHNOLOGIE TRIMBLE RTX<sup>5</sup> (SATELLITE ET CELLULAIRE/INTERNET (IP))</b>		
<b>CenterPoint RTX<sup>6</sup></b>		
	Horizontal	2 cm RMS
	Vertical	5 cm RMS
	Temps de convergence RTK pour les précisions spécifiées	< 15 min
	- Dans le monde entier	
	Temps de convergence RTK QuickStart pour les précisions spécifiées	< 1 min
	Temps de convergence RTK pour les précisions spécifiées dans certaines régions (régions Trimble RTX Fast)	< 1 min
<b>TRIMBLE xFILL<sup>7</sup></b>		
	Horizontal	RTK <sup>4</sup> + 30 mm/minute RMS
	Vertical	RTK <sup>4</sup> + 30 mm/minute RMS



MATERIEL	
<b>PHYSIQUE</b>	
Dimensions (l x h)	11,9 cm x 13,6 cm
Poids	1,12 kg avec batterie interne, radio interne avec antenne UHF 3,57 kg éléments au-dessus plus canne, contrôleur et support
Température <sup>1</sup>	Utilisation: -40 °C à +65 °C Stockage: -40 °C à +75 °C
Humidité	100% avec condensation
Étanchéité	IP67 étanche à la poussière, et protégé en cas d'immersion temporaire à 1 m de profondeur.
<b>Chocs et vibrations (testé et conforme aux normes d'environnement suivantes)</b>	
Chocs	Éteint : Conçu pour résister à une chute de la canne de 2 mètres sur du béton En marche : 3-40 G, 10 msec, en dents de scie
Vibrations	MIL-STD-810F, FIG 514.5C-1
<b>ALIMENTATION ÉLECTRIQUE</b>	
Alimentation externe de 11 à 24 V DC et protection contre les surtensions sur les ports 1 et 2 (Lemo 7 broches) Batterie intelligente lithium-ion amovible rechargeable 7,4 V, 3,7 A/h avec voyants d'état à LED Consommation électrique de 4,2 W en mode mobile RTK avec radio interne <sup>14</sup>	
<b>Autonomie avec la batterie interne<sup>15</sup> :</b>	
Option réception uniquement 450 MHz	6,5 heures
Option réception/transmission 450 MHz (0,5W)	6,0 heures
Option réception/transmission 450 MHz (2,0 W)	5,5 heures
Option réception cellulaire	6,5 heures
<b>COMMUNICATION ET STOCKAGE DES DONNÉES</b>	
Série	Série à 3 fils (Lemo 7 broches)
USB v2.0	Permet le téléchargement de données et les communications à haut débit.
Modem radio	Récepteur/transmetteur à large spectre 450 MHz complètement intégré, scellé, avec une gamme de fréquences allant de 403 MHz à 473 MHz, compatibles avec les protocoles radio Trimble, Pacific Crest et SATEL. Puissance d'émission: 2 W Portée: généralement 3 à 5 km / optimal 10 km <sup>16</sup>
Cellulaires	Modem 3,5 G intégré, HSDPA 7,2 Mb/s (téléchargement), GPRS multi-créneaux classe 12, EDGE multi-créneaux classe 12, Penta-band UMTS/HSDPA (WCDMA/FDD) 800/850/900/1900/2100 MHz, EGSM Quadri-bande 850/900/1800/1900 MHz, GSM GPRS, 3GPP LTE
Bluetooth	Port de communication de 2,4 GHz totalement intégré, totalement étanche (Bluetooth) <sup>17</sup>
Wi-Fi	802.11 b/g, mode point d'accès et client, cryptage WPA/WPA2/WEP64/WEP128
USB v2.0	Permet le téléchargement de données et les communications à haut débit.
Appareils de communication externes pour corrections pris en charge sur	Ports série, USB, TCP/IP et Bluetooth
Stockage des données	6 Go de mémoire interne : plus de dix ans de données brutes observables (environ 1,4 Mo/jour), sur la base d'enregistrement toutes les 15 secondes à partir d'une moyenne de 14 satellites
Format de stockage des données	Entrée et sortie CMR+, CMRx, RTCM 2.1, RTCM 2.3, RTCM 3.0, RTCM 3.1, RTCM 3.2 Sorties 24 NMEA, sorties GSDP, RT17 et RT27
<b>WEBUI</b>	
Grande simplicité pour le configurer, l'utiliser, connaître son état et transférer des données Accessible via WiFi, port série, USB et Bluetooth	
<b>CONTRÔLEURS SUPPORTÉS</b>	
Trimble TSC7, Trimble T10, Trimble TSC3, Trimble Slate, Trimble CU, Trimble Tablet Rugged PC, appareils Android et iOS avec applications prises en charge.	
<b>CERTIFICATIONS</b>	
FCC Part 15 (appareil de Classe B), 24, 32; marquage CE; RCM; PTCRB; BT SIG	

Table 6: Spécifications Trimble S05.

FICHE TECHNIQUE

**Trimble S5** STATION TOTALE

**PERFORMANCE**

**Mesure d'angles**

Type de capteur : encodeur absolu avec graduation diamétrale

Précision (écart type selon la norme DIN 18723) : 1" (0,3 mgr)

Affichage de l'angle (seuil minimum) : 2" (0,6 mgr), 3" (1,0 mgr), ou 5" (1,5 mgr)

Compensateur automatique de niveau : 0,1" (0,03 mgr)

**Mesure des distances**

Type : balais centre

Précision : 0,5" (0,15 mgr)

Plage : 5,4" (±100 mgr)

**Mesure des distances**

Mode prisme

Standard : 1 mm + 2 ppm

Mode DR

Standard : 2 mm + 2 ppm

Poursuite : 4 mm + 2 ppm

Mode DR

Standard : 2 mm + 2 ppm

Poursuite : 4 mm + 2 ppm

Portée étendue : 10 mm + 2 ppm

**Durée d'une mesure**

Mode prisme

Standard : 1,2 s

Poursuite : 0,4 s

Mode DR

Standard : 1,3 s

Poursuite : 0,4 s

**Plage de mesure**

Mode prisme (en conditions dégagées normales<sup>1,2</sup>)

1 prisme : 2500 m

1 prisme en mode de longue portée : 5900 m (portée max)

Portée la plus courte : 0,2 m

Mode DR

	Bonnes conditions (bonne visibilité, luminosité ambiante faible)	Conditions normales (visibilité normale, modéré, légère refraction)	Conditions difficiles (même objet sous lumière solaire directe, turbulences)
Cible blanche (coeff. réflexion 90%) <sup>4</sup>	1300 m	1300 m	1200 m
Cible grise (coeff. réflexion 19%) <sup>4</sup>	600 m	600 m	550 m
Film réfléchissant 20 mm			1000 m
Portée la plus courte			1 m
Mode DR à portée étendue			2200 m
Cible blanche (coeff. réflexion 90%) <sup>4</sup>			

**CARACTÉRISTIQUES EDM**

Source lumineuse : diode laser à impulsion 905 nm

Divergence du faisceau

Horizontale : 4 cm/100 m

Verticale : 8 cm/100 m

Spécifications susceptibles d'être modifiées sans préavis

1. Écart type selon la norme ISO 17024.
2. Conditions de mesure normales : Plu de brume, Gel max ou refroidissement modéré, sans bris, légère vibration.
3. La portée et la précision dépendent des conditions atmosphériques, de la taille des cibles et du niveau de rétro-réflexion.
4. Classe de précision IAS, Catalogue numéro E1527795
5. L'autonomie à -10 °C est égale à 70% de l'autonomie à +20 °C.
6. Les homologations Bluetooth sont spécifiques à chaque pays. Contactez votre distributeur Trimble local agréé pour de plus amples informations.
7. Selon la taille sélectionnée de la fenêtre de recherche.
8. Le temps d'acquisition de la solution dépend de la géométrie de la solution et de la qualité de la position GPS.
9. Le fonctionnement et la disponibilité dépendent de la région.

**CARACTÉRISTIQUES DU SYSTÈME**

**Laser classe**

EDM : Laser classe 1

Pointeur laser coaxial (standard) : Laser classe 2

Classe globale de produit laser : Laser classe 2

**Nivellement**

Niveau sphérique dans l'embase : 8/2 mm

Niveau électronique à 2 axes dans l'écran LCD avec une résolution de : 0,3" (0,1 mgr)

**Système servo**

Technologie servo MagDrive, lecteur direct électromagnétique de capteur angulaire/servo intégré

Vitesse de rotation : 115 degrés/seconde (128 gr/s)

Temps de rotation CC/CD : 2,5 s

Durée du positionnement 180 degrés (200 gr) : 2,5 s

Blocages et mouvements fins : servocommandés, réglage fin à l'infini

**Centrage**

Système de centrage : Trimble 3 points

Plomb optique : plomb optique intégré

Grossissement/distance de mise au point minimale : 2,3x/0,5 m à l'infini

**Lunette**

Grossissement : 30x

Ouverture : 40 mm

Champ de vision à 100 m : 2,6 m à 100 m

Distance de mise au point minimale : 1,5 m à l'infini

Réticule illuminé : variable (10 niveaux)

**Alimentation**

Batterie interne : batterie lithium-ion 11,1 V, 5,0 Ah

Autonomie<sup>5</sup>

Une batterie externe : environ 6,5 heures

Trois batteries internes dans l'adaptateur multiple : environ 20 heures

Support robotisé avec une batterie interne : 13,5 heures

**Poids et dimensions**

Instrument (Autolock) : 5,4 kg

Instrument (robotisé) : 5,5 kg

Contrôleur Trimble CU : 0,4 kg

Embase : 0,7 kg

Batterie interne : 0,35 kg

Hauteur de l'axe des tourillons : 196 mm

**Autre**

Communication : ports USB, série et Bluetooth<sup>6</sup>

Température de fonctionnement : -20 °C à +50 °C

Tracklight intégré : Disponible dans tous les modèles

Étanchéité à la poussière et à l'eau : IP65

Humidité : 100% avec condensation

Sécurité : Protection par mot de passe double-couche, L2P<sup>9</sup>

**TOPOGRAPHIE ROBOTISÉE**

Portée Autolock et Robotisé<sup>7</sup>

Prismes passifs : 500 à 700 m

Cible MultiTrack<sup>8</sup> Trimble : 800 m

Cible Active Track 360 Trimble : 500 m

Précision de pointage Autolock à 200 m (écart type)<sup>1</sup>

Prismes passifs : <2 mm

Cible MultiTrack Trimble : <2 mm

Cible Active Track 360 Trimble : <2 mm

Distance de recherche la plus faible : 0,2 m

Type de radio interne/externe : radios 2,4 GHz à étalement de spectre et sauts de fréquence

Temps de recherche (type)<sup>7</sup> : 2 à 10 s

**RECHERCHE GPS/GEOLock**

Recherche GPS/Geolock : 360 degrés (400 gr) ou fenêtre de recherche horizontale et verticale

Temps d'acquisition de la solution<sup>8</sup> : 15 à 30 secondes

Temps de ré-acquisition de la cible : <3 secondes

Portée : limites de portée Autolock et Robotisé



## II. Spécifications de la source vibrante

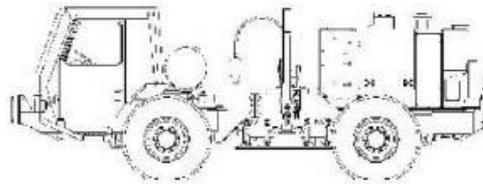


### INDUSTRIAL VEHICLES INTERNATIONAL, INC.

6737 EAST 12TH STREET, TULSA, OKLAHOMA 74112 U.S.A. PHONE (918)836-6516 FAX (918)838-9529

## EnviroVibe II

With 'minivib' 15



### PRODUCT SPECIFICATION

**CLASS:** The **EnviroVibe II** is an articulated off-road vehicle for carrying seismic energy sources. It is hydrostatically driven in a 4x4 configuration.

**TIRES:** (Four):

Standard: 500/70R24, LI157B, TLR4  
Optional: 48x31-20, 14 ply, HF3  
Optional: 600/55B-26.5, 20 ply, HF-1

**DIMENSIONS:**

LENGTH: 274.7 inches (6977 mm)  
WIDTH: (Does not include tire bulge at loaded section)  
84.7 inches (2151 mm) minimum with 500/70R24 tires  
95.7 inches (2431 mm) maximum with 500/70R24 tires  
107 inches (2718 mm) maximum with 48x31-20 tires  
HEIGHT: 99.2 inches (2520 mm) 102 inches with rotating light  
WHEELBASE: 120 inches (3048 mm)

### COMPONENTS AND ANCILLARY EQUIPMENT

**ENGINE:** Rear mounted engine is equipped with a lubrication system for operation at steep angles of inclination. The engine protection system automatically idles the Diesel under excessively high temperatures or low lubricating oil pressure.

John Deere 4045HF485 (Tier 3, Stage 3): 173 horsepower (129 kW) @ 2,400 RPM continuous rating.

**TRACTION PUMP:** Variable displacement, axial piston type, electric displacement control: 4,060 psi (280 bar) continuous; 6,525 psi (450 bar) intermittent, pressure-override control.

**DRIVE TRAIN:** The **EnviroVibe II** is a full-time 4-wheel drive vehicle. Variable displacement hydraulic motors are coupled to single reduction gearboxes which drive the axles via telescoping driveshafts.

**HYDRAULIC MOTORS:**

Rear: Axial piston, variable displacement type. 4060 psi (280 bar) continuous; 7400 psi (510 bar) intermittent. Electric motor displacement control via joystick.

INDUSTRIAL VEHICLES INTERNATIONAL

Front: Axial piston, variable displacement type. 4060 psi (280 bar) continuous; 7400 psi (510 bar) intermittent. Automatic hydraulic motor displacement control via drive system pressure, electrical override.

GEARBOX: Single speed, 2.16:1.

DRIVE AXLES, FRONT & REAR: Outboard planetary type; 19.84:1. Internal wet disc brakes and differential lock.

**STANDARD DRIVE TRAIN DYNAMIC PERFORMANCE:**

**TRACTIVE EFFORT, VELOCITY, & GRADABILITY**

At 3500 psi (207 bar), 2400 engine RPM, no ground slippage, standard tires (500/70R24), 414 rev/mi (259 rev/km), GVW 28,230 lbs (12,805 kgf).

SPEED	TRACTIVE EFFORT		VELOCITY		GRADE
	lb	N	mph	km/h	degrees
LO 4WD	20,912	93,019	3.1	5,0	29.6
MID 4WD	8,365	37,208	7.8	12,6	16.1
HI 4WD	4,182	18,604	15.7	25,2	8.5

**COOLING:** The water-cooled Diesel engine's heat is dissipated via a suction-fan cooled radiator. The hydraulic system oil is cooled with a series mounted radiator capable of dissipating over 56 hp (42 kW) in heat. Optional bypass valving is available for cold weather operation. Chaff screens minimize radiator core fouling.

**FUEL:** Fuel tank capacity = 100 US gal (375,5 liters).

**HYDRAULIC LINES AND VALVING:** Hydraulic fluid lines are adequately sized to keep peak flow velocities below 35 ft/sec (10,7 m/s). Large connections use SAE flange fittings for ease of maintenance. Relief valves in critical locations limit peak pressure under dynamic braking conditions to 4,500 psi (310 bar).

**BRAKES:** The vehicle is equipped with three braking systems:

1. Hydrodynamic braking (normal).
2. Hydraulic wet disc brakes on the axle shafts (service).
3. Spring applied, hydraulically released wet disc brakes on the axle input shaft (parking).

**MANEUVERABILITY:** Wagon wheel, hydraulic-power steering;  $\pm 40^\circ$ . Suspension of front section oscillates  $\pm 15^\circ$  with respect to rear wheels. Approach angle;  $25^\circ$ . Departure angle;  $31^\circ$ .

INDUSTRIAL VEHICLES INTERNATIONAL

**TURN RADIUS:**

TIRE	CL OF TIRE	CURB CLEARANCE
500/70R24:	211.6 inches (5375 mm)	221.4 inches (5623 mm)

**OPERATOR'S CAB:** The operation of the vehicle and vibrator is simply controlled and monitored from within the operator's cab which features: off-road suspension driver's seat and a padded passenger seat; structural reinforcement for tip-over protection; forward hinged driver's and passenger's doors.

The vehicle velocity (both forward and reverse) is controlled by a pedal with a spring-centered safety feature. The maximum speed is selected with a joystick. A pedal valve is used for the disc brakes controlling each axle.

The hydraulic parking brakes are spring applied and released by a rotary hydraulic valve. The hydraulic axle differential locks are solenoid valve controlled.

Manually operated switches and valves on the instrument panels control the following functions and components: engine start; diesel engine speed; vibrator pump hydraulic pressure; traction control; headlights, dimmer, parking, turn-signals, warning, floodlights, and dome light; windshield wiper; heater & air conditioning; electric horn; and engine shutdown.

Operational parameters are measured and displayed as follows: traction system pressure; vibrator system pressure; lift system pressure; return (low) pressure; engine speed; engine hourmeter; engine oil pressure; engine coolant temperature; hydraulic oil temperature; fuel level; battery voltage. Other parameters can be shown on the digital display gauges as required.

A warning light panel is installed on the overhead console with high intensity bulbs that can easily be seen in bright daylight. The following warning and indicating annunciators are included on this panel: turn signals; vibrator travel locks not engaged; high beam position of headlights. A backup alarm is sounded when the vehicle is put in reverse.

Rear view mirrors are positioned outside both door windows. An LCD display rear-view camera system monitors the vibrator well and the rear of the vehicle.

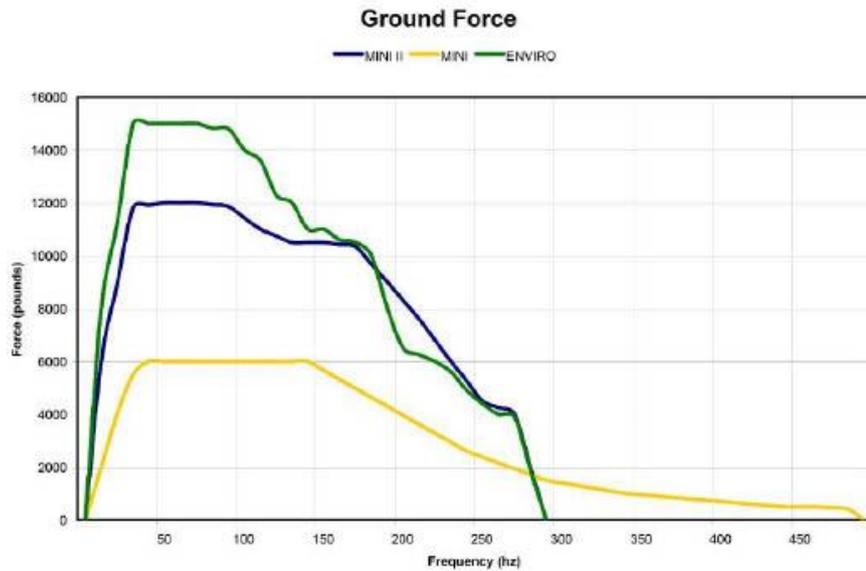
**NOISE:** At a distance of 23 feet (7 meters) from the side of the vehicle, with the vehicle stationary, the engine at 1800 RPM, the vibrator pump pressurized, and noise reduction panels in place, the noise level is 78 dbA. Under the same conditions, with the engine at 800 rpm, and the vibrator pump not pressurized, the noise level is 65 dbA.

**INDUSTRIAL VEHICLES INTERNATIONAL**

BRGM  
2022P22038



CATEGORY	ENGLISH	METRIC
Max. Peak Force	14,940 lbf.	66.456 N.
Mass Piston Area	4.98 sq. in.	32,1 sq. cm.
Reaction Mass Weight	1750 pounds	794 kgf.
Reaction Mass Stroke	2.75 inches	6,99 cm
Servo valve	60 gpm	227 l/m
Servo valve Pilot Filter	3 micron	3 micron
Baseplate Area	1,810 sq. in.	11.677 sq. cm.
Baseplate Assembly Weight	855 pounds (with pad)	388 kg. (with pad)
Lift System Stroke	38 inches	96,5 cm.
Lift Cylinder Diameter	2.5 inches	6,3 cm.
Lift Synchronization	Mechanical Crossbeam	Mechanical Crossbeam
Vibrator Pump Flow	53 gpm	201 l/m
Holddown Weight	16,500 pounds	7484 kgf
Frequencies	10-300Hz	10-300Hz



### III. Spécification du sismographe

#### SmartSolo® World's First Smart Seismic Sensor

The seismic industry continues to demand that exploration is carried out at ever-greater scale and receiver density, while somehow attempting to balance the requirement to keep project costs under control. To provide the industry with a solution to this challenge, DTCC has developed the SmartSolo intelligent seismic sensor.

SmartSolo is based on DT-SOLO, the high-sensitivity geophone and focuses on the principal of seismic exploration which is known as **3W** (Wave = high fidelity signal; When = accurate timing; and Where = the location), incorporated with electronics and software technologies in mobile internet era. This smart sensor provides adequate info for highest-quality seismic data acquisition while keeping its functions and structure as simple as possible. Electronics and software technologies are super reliable, mature and cost-effective in mobile internet era. These technologies are used for SmartSolo at maximum possible scale. The result: the geophone is something smart, reliable, user-friendly, cost-effective and could run in any harsh environment.

Patent Publication Number 201630504296.0  
Patent Pending Number 201610905491.3



Lowest per Channel Cost in the Seismic Industry



Small Footprint  
95mm X 103mm



Mobile App  
Scanning & Technical Support



No Exposed Connector in the Field



50 days  
50 Days Operating Life  
@ 25°C 1ms 12h ON/12h OFF



Stake-less Operation for Max Flexibility



Light Weight  
1.1 kg (including battery and spike)



8-32GB  
Built-in 8GB Non-volatile Flash Memory could be Expanded to 32 GB



DT-SOLO  
High-sensitivity Sensor Technology (10Hz & 5Hz optional)



Optional External Battery and Sensor



Automatic Sensor Testing and GPS Logging



Auto Scan Mode for Fast Deployment

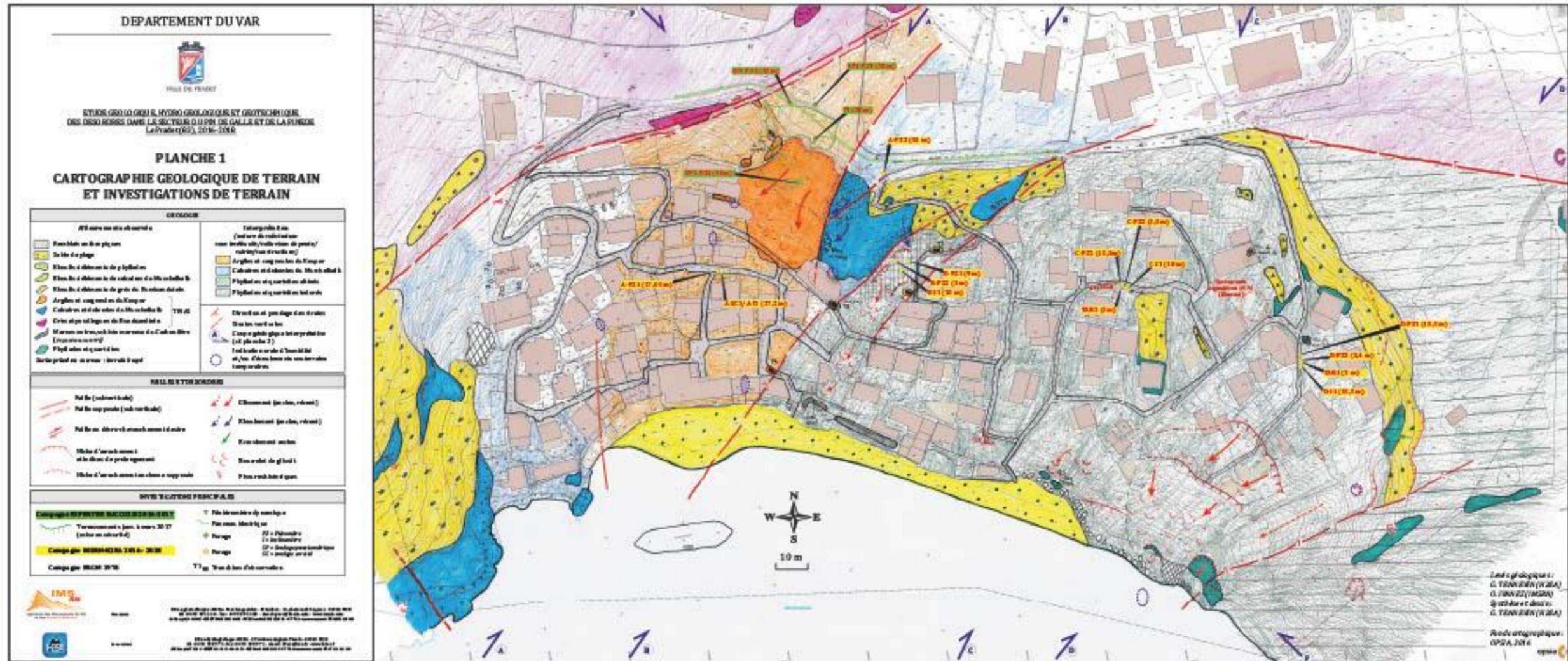
516022



## **Annexe 4**

### **Carte géologique et coupes géologiques de H2EA, 2018 (2 planches hors rapport)**









**RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE**

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*

**Centre scientifique et technique**

3, avenue Claude-Guillemin  
BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34

**Direction Régionale Provence- Alpes-Côte d'Azur**

117, avenue de Luminy – BP 168

13276 Marseille cedex 09 – France

Tél. : 04 91 17 74 77

[www.brgm.fr](http://www.brgm.fr)



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**