



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Document à accès immédiat

Gestion du risque affaissement-effondrement lié à la dissolution de gypse - Commune de Bargemon (Var)

Rapport final

BRGM/RP-71427-FR

Version v7 du 15/11/2022

Étude réalisée dans le cadre des opérations de service public du BRGM

N. Marçot, M. Genevier, J. Abad, G. Aslan, L. Beccaletto, A. Bitri, R. Coueffe, M. De Michele, E. Equilbey, I. Gaudot, A. Portal, M. Lombard, M. Ibba, B. Ladouche, B. Maurice, et R. Wright

Vérificateur :

Nom : Colas Bastien

Fonction : Ingénieur géotechnicien

Date : 29/07/2022

Signature :

Approbateur :

Nom : Duhamel-Achin Isabelle

Fonction : Directrice Régionale PACA

Date : 02/11/2022

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



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 mis à votre disposition.

Mots clés : Risque naturel, Carte de sensibilité, Gypse, Dissolution, Effondrement, Tassement, Fontis, Mouvement de terrain, Hydrogéologie, aquifère, conductivité, température, hydrochimie, vulnérabilité, bâtiment, géologie, géologie structurale, géophysique, tomographie électrique, méthode sismique, sismique réflexion, sismique réflexion, interférométrie radar, géotechnique, Provence-Alpes-Côte d'Azur, Var, Bargemon

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

N. Marçot, M. Genevier, J. Abad, G. Aslan, L. Beccaletto, A. Bitri, R. Coueffe, M. De Michele, E. Equilbey, I. Gaudot, A. Portal, M. Lombard, M. Ibba, B. Ladouche, B. Maurice, et R. Wright (2022) – Gestion du risque affaissement-effondrement lié à la dissolution de gypse - Commune de Bargemon (Var). Rapport final. BRGM/RP-71427-FR, 299 p., 131 ill., 8 ann.

Synthèse

La commune de Bargemon est concernée par les problèmes de dissolution du gypse depuis de nombreuses années, formation du « trou de Jubille » et effondrement de Favas (il y a environ 100 ans), désordres structuraux atteignant certains bâtis du cœur de village depuis les années 1970, et l'effondrement en 1992 du Peyrui. L'établissement d'un PPR mouvements de terrain approuvé en 1996, identifie le secteur du Peyrui comme zone inconstructible. Plus récemment, les travaux de reconnaissance pour connaître les origines possibles des désordres observés dans le centre du village et les mesures conservatoires associées pouvant être prises en première urgence, ont permis de proposer des premières solutions de gestion du risque. Aujourd'hui, le risque effondrement-affaissement associé au phénomène de dissolution de gypse dépasse le simple cadre de la zone du Peyrui ou du cœur de village; il convient alors de bâtir une stratégie globale de gestion du risque effondrement-affaissement lié à la dissolution de gypse sur la commune de Bargemon et d'améliorer la connaissance du phénomène pour proposer des solutions adaptées.

Le programme proposé par le BRGM a permis d'aborder la problématique sous un angle pluridisciplinaire en analysant d'une part la susceptibilité aux effondrement-affaissement liés à la dissolution de gypse à l'échelle communale par une analyse détaillée des contextes géologiques et hydrogéologiques au regard de la spécificité du phénomène à aborder, et d'autre part la collecte, l'analyse et la structuration des mouvements de terrain et des dommages associés au phénomène. Dans le cœur du village, un travail plus poussé devait permettre de définir la géométrie des formations présentes en profondeur à partir de synthèses existantes et de nouvelles acquisitions spécifiques géophysiques au sol et géologiques par sondage, et d'autre part de mener une analyse détaillée de la typologie des désordres constatés intégrant en particulier la vulnérabilité des ouvrages en précisant localement l'influence des eaux de ruissellement et d'infiltration au voisinage des désordres constatés. L'objectif final était de proposer une carte de sensibilité hiérarchisée pour le phénomène effondrement-affaissement lié à la dissolution de gypse sur la commune, associée à des recommandations de gestion du risque adaptées (prévention, protection et mesures de sauvegarde).

En résumé, des progrès certains ont été apportés en géologie sur les formations gypsifères du Keuper et leur organisation structurale (e.g. alignement orienté N110 des principales masses de gypse et des fontis déjà connus ou nouvellement découverts) même s'il demeure encore des incertitudes majeures sur la géologie (1) en surface (faute d'affleurements visibles), et (2) surtout en profondeur (faute de sondages profonds) pour pouvoir spatialiser à minima la continuité des horizons de gypse latéralement dans le sous-sol et dans un contexte structural complexe (plis et fractures).

La compréhension du fonctionnement hydrogéologique des massifs de la commune a fortement progressé. Le rôle central de l'hydrogéologie dans la dissolution du gypse a été mise en évidence avec une vision des processus assez bien circonscrites à des territoires relativement réduits en sub-surface autour des bâtis dégradés (délimitation cartographique de la sensibilité). Cependant, bien que des moyens conséquents aient déjà pu être déjà mobilisés, la continuité des formations de gypse demeure floue et incertaine en profondeur et latéralement : forages peu profonds de vingt mètres, réalisés en fonction de la capacité budgétaire du projet et une distribution des sondages plus large permettraient d'améliorer la connaissance latérale avec une maille plus régulière. D'autre part, le contexte climatique conjoncturel défavorable à la circulation d'eau (déficitaire en eau en période de recharge habituelle hivernale et sécheresse marquée pendant la période estivale avec peu d'épisodes pluviométriques marqués sur le temps de l'étude) laisse supposée que les phénomènes de dissolution pendant la période d'étude ont pu être moins

marqués ou tout au moins modérés entre 2019 et 2022. Des suivis en continu des circulations d'eau sur des périodes plus longues, et en conditions plus contrastées (hautes eaux/basses eaux) permettraient de davantage capitaliser les informations sur les dynamiques de dissolution habituelles et récurrentes (temporalité, rapidité et fréquence des mécanismes/processus de dissolution en fonction des précipitations et circulation d'eaux de ruissellement, d'infiltration et souterraines), notamment des mesures de suivi de quelques sources clés du village, associées à un inventaire exhaustif du réseau de drainage des eaux communales et de son fonctionnement (bilan quantifié des volumes/débits et des prélèvements avec estimation des pertes hydriques éventuelles).

Le travail réalisé en géophysique a apporté également de nouveaux éclairages, notamment pour la connaissance géologique. Le contexte géologique et structural favorable à la survenue d'évènements comme celui du Peyrui a été confirmé et clarifié : l'accumulation de gypse sous l'effet de plis anticlinaux conjuguée à de la fracturation favorisant l'infiltration d'eau. Dans le village de Bargemon, la géophysique a permis d'écarter certaines hypothèses quant à l'origine des dommages observés sur les bâtiments. Plus globalement, la géophysique a permis de faire avancer et orienter la réflexion tout au long de l'étude sur les secteurs à investiguer en priorité ou non, et a en particulier guidé le choix de localisation des forages.

Les analyses interférométriques ont identifié (analyse en début d'étude), puis affiné (analyse en fin d'étude) une zone d'affaissement active centrée autour de la plaine du Riou, partiellement reconnue en géophysique lors de l'étude. La poursuite des mesures interférométriques en continu, au moins jusqu'à un nouveau cycle de saturation des versants, permettrait de savoir à court terme si la dissolution continue bien de ralentir.

Enfin, l'approche des dommages aux bâtis constitue un état des lieux et restera essentielle à suivre en cas de poursuite des dégradations. Si l'entretien courant des bâtiments s'impose partout sans exception, la sécurisation des bâtiments les plus endommagés reste à envisager de manière particulière. Cette approche a toutefois apporté peu d'informations sur les processus de dissolution du gypse d'un point de vue global.

Au final, la sensibilité mouvement de terrain liée à la dissolution du gypse se répartit comme suit :

- zones de niveau fort couvrant 5,61 ha, soit 14,7 % du territoire communal ;
- zones de niveau moyen couvrant 8 ha, soit 22,7 % du territoire communal ;
- zones de niveau faible couvrant 6,52 ha, soit 18,5 % du territoire communal ;
- 44,1 % du territoire communal n'est pas concerné par la sensibilité mouvement de terrain lié à la dissolution du gypse.

Le croisement des zones de sensibilité définies avec le bâti (1503 bâtiments indifférenciés inventoriés) montre que :

- 99,5 % du bâti communal est concerné par la sensibilité à différents niveaux :
 - 26,8% de niveau fort,
 - 65,1% de niveau moyen,
 - 7,7% de niveau faible.

Sur la base des connaissances acquises au cours de cette étude, une synthèse des recommandations est proposée pour mieux gérer et appréhender le risque complexe de dissolution du gypse sur la commune de Bargemon : informer sur le risque et ses conséquences, améliorer la connaissance, prévenir les désordres, agir sur les facteurs aggravant les phénomènes de dissolution et surveiller les zones sensibles identifiées.

Sommaire

1. Contexte général	15
1.1. CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ÉTUDE	15
1.2. MÉTHODOLOGIE	15
1.3. MOYENS MIS EN ŒUVRE	16
2. État des connaissances sur les effondrements liés à la dissolution du gypse sur Bargemon et aux abords de la commune.....	19
2.1. TYPOLOGIE DES MOUVEMENTS DE TERRAIN LIÉS À LA DISSOLUTION DU GYPSE	21
2.2. ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE	22
2.3. HISTORICITE DES ÉVÈNEMENTS D'EFFONDREMENT ET D'AFFAISSEMENT AINSI QUE DES ÉVÈNEMENTS DE GLISSEMENTS DE TERRAIN POTENTIELLEMENT LIÉS À LA DISSOLUTION DU GYPSE, SUR BARGEMON ET AUX ALENTOURS.....	35
3. Programme de travail : mise en œuvre et résultats	47
3.1. DÉTECTION ET SURVEILLANCE DE LA DÉFORMATION DU SOL PAR L'INTERFEROMETRIE RADAR.....	47
3.1.1. Objectifs	47
3.1.2. Méthodologie	47
3.1.3. Réalisation et traitement.....	47
3.2. SYNTHÈSE GÉOLOGIQUE LOCALE ET RÉGIONALE ET RÉINTERPRÉTATION STRUCTURALE	57
3.2.1. Cadre géologique.....	57
3.2.2. Les campagnes de terrain.....	63
3.2.3. Observations, interprétations et résultats	65
3.2.4. Résumé des principaux résultats et conclusion de l'étude géologique	78
3.2.5. Perspectives	79
3.3. SYNTHÈSE HYDROGÉOLOGIQUE À L'ÉCHELLE DE LA COMMUNE ET DU CENTRE VILLAGE, MODÈLE CONCEPTUEL DU FONCTIONNEMENT HYDROGÉOLOGIQUE DES AQUIFÈRES	79
3.3.1. Objectifs de l'approche hydrogéologique.....	79
3.3.2. Principe de dissolution du gypse	80
3.3.3. Moyens et méthodes mises en œuvre.....	82
3.3.4. Contexte hydrogéologique à l'échelle régionale	89
3.3.5. Résultats et interprétations des investigations.....	92
3.4. MANIFESTATIONS ET IMPACTS EN SURFACE, VULNÉRABILITE DES BATIMENTS (CENTRE VILLAGE ET COMMUNE).....	132
3.4.1. Objectifs	132
3.4.2. Contexte urbain de Bargemon.....	133
3.4.3. Évaluation des dommages	136
3.5. IMAGERIE DES FORMATIONS DE SUB-SURFACE PAR MÉTHODES GÉOPHYSIQUES 2-D/3-D.....	143
3.5.1. Données existantes.....	143
3.5.2. Choix des méthodes	144
3.5.3. Réalisation	145
3.5.4. Résultats et interprétation	151

4. Interprétation de l'ensemble des résultats.....	167
4.1. BILAN INTERPRÉTATIF DES RÉSULTATS : AVANCÉES, LIMITES ET PREMIÈRES RECOMMANDATIONS.....	167
4.2. DECOUPAGE DU TERRITOIRE COMMUNAL EN ZONES GÉOLOGIQUES HOMOGENES.....	169
4.2.1. Secteurs à l'affleurement	170
4.2.2. Secteurs en pied de buttes jurassiques	171
4.2.3. Secteurs de flancs de buttes jurassiques	172
4.2.4. Secteurs non concernés <i>a priori</i> par la dissolution de gypse (plateau et cœurs de buttes).....	172
4.2.5. Bilan sur le découpage de la commune en grandes zones homogènes.....	172
5. Cartographie de la sensibilité effondrement lié à la dissolution du gypse.....	175
5.1. MÉTHODOLOGIE	175
5.2. DÉTERMINATION DES ZONAGES DE SENSIBILITÉ	177
5.2.1. Détermination des niveaux de sensibilité de base pour chacune des grandes zones homogènes.....	178
5.2.2. Ajustement local du niveau de sensibilité.....	183
5.3. CARTE DE SENSIBILITÉ RÉSULTANTE.....	186
6. Recommandations	189
6.1. RECOMMANDATIONS GÉNÉRALES.....	190
6.2. GESTION DES EAUX SUPERFICIELLES.....	190
6.3. SUIVI/SURVEILLANCE DES DÉSORDRES (À COURT MOYEN TERME).....	191
6.4. INVESTIGATIONS COMPLÉMENTAIRES (À PLUS LONG TERME).....	191
7. Conclusions et perspectives.....	193
8. Bibliographie.....	195

Liste des Illustrations

Illustration 1 : Aperçu de l'effondrement du Peyrui de 1992 (photo DDTM83).	19
Illustration 2 : Carte informative relative à la sensibilité mouvements de terrain liés à la dissolution de Gypse.	20
Illustration 3 : Schéma d'apparition d'une cuvette d'affaissement (d'après "le guide Aléa Gypse").	21
Illustration 4 : Schéma d'apparition d'un effondrement (d'après le "guide Aléa Gypse").	22
Illustration 5 : Extrait du rapport de Pothérat (1997) montrant une esquisse structurale de la région de Bargemon d'après photo-interprétation (Mission IGN, 1979 à 1/14 500, cliché n°3007).	25
Illustration 6 : Relations spatiales entre les axes de plis et les effondrements de Figanières à Seillans, d'après l'article BLPC 209 pp 69-81 Pothérat (1997).	26
Illustration 7 : Schéma présentant une hypothèse d'évolution polyphasée de cavités de dissolution dans le gypse du Trias de Provence, région de Bargemon, Var (d'après Pothérat, 1997).	27
Illustration 8 : Coupes et colonne stratigraphique proposée par F. Fiolet (2000)	29

Illustration 9 : Carte régionale des glissements de terrain (Lebourg, Zerathe (2013)).	31
Illustration 10 : Proposition d'un modèle cinématique du glissement de terrain en profondeur (Lebourg, Zerathe (2013)).	32
Illustration 11 : Localisation des désordres sur le plan cadastral (parcelles 231, 232, 249, 591 et 592 des rues Maurel et Marceau) d'après BRGM/RP-60536-FR.	33
Illustration 12 : Désordres sur les habitations du centre-bourg (Source : rapport BRGM/RP-60536-FR par Rivet et Mathon, 2011).	34
Illustration 13 : Carte géomorphologique du versant de Bargemon proposée par F. Fiolet (2000).	37
Illustration 14 : Localisation et description des principaux effondrements recensés sur la commune de Bargemon.	41
Illustration 15 : Inventaire des événements mouvements de terrain sur et aux alentours de la commune de Bargemon; fond géologique régional: carte harmonisée du Var.	42
Illustration 16 : Inventaire des événements mouvements de terrain (table descriptive).	45
Illustration 17 : Les vitesses positives (couleurs froides) représentent les zones stables et le déplacement du sol vers le satellite, tandis que les vitesses négatives (couleurs chaudes) indiquent un éloignement du satellite.	49
Illustration 18 : Déformées verticales moyennes mesurées en mm/an entre 2016 et 2020 (source EGMS) sur Bargemon et alentours.	51
Illustration 19 : Déformées horizontales moyennes mesurées en mm/an entre 2016 et 2020 (source EGMS) sur Bargemon et alentours.	52
Illustration 20 : Zone anomalique avec déformées verticales moyennes supérieures à 4,5 mm/an.	54
Illustration 21 : Chronique interférométrique (déformée verticale) sur un point de suivi au cœur du bourg (cercle blanc) i.	55
Illustration 22 : Fluctuations saisonnières plus prononcées liés aux effets thermiques.	55
Illustration 23 : Tendance au ralentissement de l'affaissement depuis le début de suivi en 2016.	56
Illustration 24 : Chronique interférométrique (déformée horizontale ouest-est) sur un point de suivi au cœur du bourg (cercle blanc).	56
Illustration 25 : Fluctuations synchrones des déformées verticales et horizontales (composante est-ouest).	57
Illustration 26 : Succession stratigraphique du Keuper d'après la notice de la feuille de Fayence (n°998).	59
Illustration 27 : Extrait de la carte géologique harmonisée du Var dans le secteur de Bargemon, avec superposition des axes synclinaux et anticlinaux affectant les unités triasiques et jurassiques.	60
Illustration 28 : Corrélations lithostratigraphiques entre les unités triasiques décrites dans la notice de la feuille de Bargemon (à gauche) et celles typiques du Trias provençal (à droite ; J-P. Caron dans Villeneuve <i>et al.</i> , 2018).	62
Illustration 29 : Carte de localisation des stations d'observation visitées au cours des 2 campagnes de reconnaissance sur le terrain.	64

Illustration 30 : Représentation stéréographique (hémisphère inférieur) de la stratification des séries jurassiques (à gauche, pôles et plans), des séries triasiques (au centre, pôles et plans), et des directions de fracturation dans les séries jurassiques et triasiques (à droite, rose diagramme).	65
Illustration 31 : Carte de localisation des mesures et observations structurales et des photo-interprétations réalisées par Pothérat (1997).	66
Illustration 32 : Exemple de fracturation sub-verticale dans les dolomies du Keuper inférieur (2 plans de fracturation en rose et jaune), BAR083, localisation Illustration 29. .	67
Illustration 33 : Exemple de fracturation sub-verticale dans les calcaires du Jurassique (2 plans de fracturation en vert et bleu), BAR105, localisation Illustration 29.	67
Illustration 34 : Localisation des coupes géologiques et des photos d’affleurement.	69
Illustration 35 : Coupes géologiques N110, N20 Ouest et N20 Est, localisation sur l’Illustration 29.....	70
Illustration 36 : Anticlinal ouvert d’axe N100-120 dans les dolomies du Muschelkalk (t2c), vue vers l’ouest, BAR103, localisation Illustration 34.	71
Illustration 37 : Coupe géologique de la Sambourette, localisation sur l’Illustration 34.	71
Illustration 38 : Mini diapir de gypse, station BAR092, localisation Illustration 34.	72
Illustration 39 : Le diapir de gypse du Baou, paroi sud-est de l’effondrement (25 mètres à l’ouest de BAR110), localisation Illustration 34.	73
Illustration 40 : Barre dolomitique pluri métrique jaunâtre à litage net, située à une dizaine de mètres au-dessus stratigraphiquement d’un niveau de gypse exploitée artisanalement (station BAR012). À noter la fracturation subverticale très nette de direction N010-020 affectant cette barre sur la gauche de la photographie, localisation Illustration 34.	73
Illustration 41 : Affleurement isolé de gypse et argiles gypsifères versicolore (BAR077), localisation Illustration 34.	74
Illustration 42 : Carte de localisation des fontis nouvellement découverts dans le secteur de Sambourette (BAR85-89-90) et du fontis de Pisse-Lèbre (BAR93), déjà répertorié. Voir l’Illustration 34 pour la légende.	75
Illustration 43 : Fontis de la Sambourette 1 ; vue vers le sud (BAR085).	75
Illustration 44 : Fontis de la Sambourette 2 ; vue vers l’ouest (BAR089).	76
Illustration 45 : Fontis de la Sambourette 3 ; vue vers l’ouest (BAR090).	76
Illustration 46 : Localisation des fontis (non visibles) sur la photographie aérienne de 1958.	77
Illustration 47 : Alignement selon une direction N110 des fontis connus sur la commune de Bargemon. Voir l’Illustration 34 pour la légende.	78
Illustration 48 : Principe général de mise en place d’un mécanisme de dissolution du gypse (Ineris et Cerema, 2018).	81
Illustration 49 : Schéma du lien à établir entre la minéralisation d’un point d’eau et le phénomène de dissolution du gypse à déduire en amont et en aval.	81
Illustration 50 : Localisation des points d’eau de mesure de la conductivité électrique, des points prélevés pour les campagnes géochimiques et des points instrumentés sur fond de carte géologique harmonisée à échelle du 1/50 000 (@BRGM, cf. § 3.2.2 pour la légende).	83

Illustration 51 : Chronique piézométrique du piézomètre DCE de Draguignan permettant d'illustrer la situation hydrique des campagnes de prélèvement (en rouge) et de mesure (en violet).....	84
Illustration 52 : Processus d'échanges isotopiques susceptibles d'affecter la signature isotopique de l'eau (^{18}O , ^2H) (d'après Clark et Fritz, 1997).....	86
Illustration 53 : Photographies de l'équipement du piézomètre situé à côté du forage du stade (1 et 2), de la source de la Haute-Platrière (3 et 4), de la source du Clos (5 et 6) et de la source du Lavoir (7 et 8).....	88
Illustration 54 : Photographie de l'instrumentation du piézomètre "FPey".	88
Illustration 55 : Photographies de la source du Vallon de Notre-Dame.	89
Illustration 56 : Carte du contexte hydrogéologique régional.	91
Illustration 57 : Localisation des sources recensées sur la commune de Bargemon sur fond de carte géologique harmonisée au 1/50 000 (@BRGM) et de carte topographique au 1/25 000 (@IGN).	92
Illustration 58 : Origine des fontaines et des écoulements aériens du centre-bourg.....	93
Illustration 59 : Altitude et estimation des débits des treize sources recensées sur la zone étudiée.	94
Illustration 60 : Photographie de la source de la Traverse du Lauron par rapport à l'emplacement de la source du Lauron.	95
Illustration 61 : Balances ioniques des analyses réalisées sur les campagnes de prélèvement de basses et hautes eaux.....	96
Illustration 62 : Diagramme de Piper de l'ensemble des analyses chimiques de hautes et basses eaux.	97
Illustration 63 : Diagramme de Schöeller Berkloff des analyses de basses eaux (juin 2019). .	98
Illustration 64 : Diagramme de Schöeller Berkloff des analyses de hautes eaux (décembre 2019).....	99
Illustration 65 : Diagramme de Schöeller Berkloff des analyses de hautes eaux (janvier 2020).	100
Illustration 66 : Diagrammes binaires sur les résultats des campagnes hautes et basses eaux.	102
Illustration 67 : Localisation des sources et forages dont les analyses chimiques ont été utilisées pour une comparaison avec les prélèvements sur Bargemon.....	103
Illustration 68 : Diagramme de la concentration en calcium en fonction de celle en sulfates des prélèvements réalisés en basses eaux sur Bargemon et des 10 points d'eau régionaux.....	104
Illustration 69 : Indices de saturation des eaux vis-à-vis des principales phases minérales pour l'ensemble des prélèvements en basses et hautes eaux.	105
Illustration 70 : Représentation graphique des indices de saturation des phases minérales (a) du gypse, (b) de la calcite, (c) de la dolomie pour l'ensemble des prélèvements d'eau réalisés en basses et hautes eaux.....	107
Illustration 71 : Signature isotopique en deutérium en fonction de l'Oxygène 18 pour les eaux prélevées à Bargemon en juin 2019 (basses eaux).	108

Illustration 72 : Zoom sur la signature isotopique des eaux en excluant le point excentré « Cave Virginie ».	109
Illustration 73 : Cartes de deux campagnes de mesure de la conductivité électrique sur les eaux souterraines et les écoulements de surface sur la commune de Bargemon.	111
Illustration 74 : Photographies de la source Ste Bibiane (à gauche) et du mur de soutènement de la propriété au 463 rue Jean Jaurès au pied duquel se situe le piézomètre "Froute". L'affaissement de la route est visible sur la photo (marqué par la flèche orange).	113
Illustration 75 : Carte du secteur du désordre de la rue Jean Jaurès localisant le tracé de la coupe hydrogéologique de l'illustration 77.	114
Illustration 76 : Diagraphies de conductivité électrique réalisées sur le piézomètre Froute.	115
Illustration 77 : Coupe hydrogéologique du secteur du désordre de la rue Jean Jaurès et de la source Ste Bibiane © BRGM Gennevier.	116
Illustration 78 : Diagraphies de conductivité électrique réalisées sur le piézomètre FPey.	117
Illustration 79 : Chroniques de conductivité électrique des source du Clos, du Lavoir et de la Haute Platrière de décembre 2020 à février 2022 et du Vallon Notre Dame de décembre 2021 à février 2022. Les précipitations sont également présentées, à partir de juin 2019.	121
Illustration 80 : Chroniques de niveau d'eau, température et conductivité électrique enregistrées sur FPey de juillet 2020 à avril 2021, et chroniques de précipitations associées.	122
Illustration 81 : Diagraphie de la conductivité et de la température du piézomètre du stade réalisée le 13/12/2019.	123
Illustration 82 : Chronique piézométrique du piézomètre du stade entre décembre 2019 et novembre 2020.	125
Illustration 83 : Chroniques du niveau piézométrique et de la conductivité électrique du piézomètre du stade. Les mesures ponctuelles de la conductivité sur le robinet du forage du stade sont également affichées.	126
Illustration 84 : Taux massiques exportés et surface d'échange équivalente de lentille gypseuse calculés sur les sources du Canal de la Poste, du Clos, du Lavoir et du Lauron.	127
Illustration 85 : Taux massiques exportés et surface d'échange équivalente de lentille gypseuse calculés sur les sources de la Traverse du Lauron et du Vallon Notre Dame.	127
Illustration 86 : Carte du contexte hydrogéologique de Bargemon localisant le tracé de la coupe hydrogéologique dressée sur le centre-ville.	129
Illustration 87 : Coupe hydrogéologique dans le secteur du centre-ville de Bargemon restituant le schéma conceptuel du fonctionnement hydrogéologique des aquifères sur la commune © BRGM Gennevier.	130
Illustration 88 : Carte présentant le contexte hydrogéologique du centre-ville et du versant nord de Bargemon. Le zonage de dissolution du gypse figure également.	131
Illustration 89 : Données INSEE (2017).	134

Illustration 90 : Carte issue de la base de données GHS-BUILT sur la commune de Bargemon.	135
Illustration 91 : Cadastre « napoléonien » datant de 1837 sur Bargemon (Archives Départementales du Var).	136
Illustration 92 : Cadastre « rénové » de 1938 sur Bargemon (Archives Départementales du Var).	136
Illustration 93 : Classification des typologies de dommages observés sur le bâti de Bargemon.	138
Illustration 94 : Représentation cartographique des bâtiments endommagés sur Bargemon sous forme d'une heatmap (carte de fréquentation).	139
Illustration 95 : Extrait de la cartographie de l'exposition au retrait gonflement argileux à hauteur de la commune de Bargemon (83) avec sinistralité associée et de l'unique reconnaissance CAT NAT pour sécheresse (source : Géorisques). .	140
Illustration 96 : Répartition des bâtiments diagnostiqués par niveau d'endommagement et en fonction de la hauteur.	142
Illustration 97 : Confrontation des déformées interférométriques par rapport aux niveaux d'endommagement.	142
Illustration 98 : Synthèse des études géophysiques existantes. La carte gravimétrique représente en rouge les anomalies positives et en bleu les anomalies négatives (Bouvier et Cova, 1994). Les lignes noires discontinues correspondent aux coupes A et B présentées à l'illustration suivante.	143
Illustration 99 : Coupes interprétatives réalisées à partir de sondages électriques (Bouvier et Cova, 1994). Les valeurs de résistivité sont indiquées dans les horizons. ...	144
Illustration 100 : Caractéristiques techniques et statistiques post-traitement des profils TRE.	145
Illustration 101 : Photo du résistivimètre lors de l'acquisition le long de PE2.	146
Illustration 102 : Carte de localisation des acquisitions géophysiques.	148
Illustration 103 : Caractéristiques des profils sismiques 2-D.	149
Illustration 104 : Photos des instruments sismiques. a) Géophone 10 Hz utilisé pour l'acquisition sismique réfraction de PS1. b) Capteur RAU utilisés pour l'acquisitions sismique 3-D. c) Source sismique A-200. d) Dispositif d'acquisition MASW utilisé dans le centre de Bargemon (ici espacement entre capteurs de 0,5 m et opérateur au tir manuel à la double-masse.	150
Illustration 105 : Le Plan - Profil PE1 – Coupe de distribution des résistivités électriques interprétées.	151
Illustration 106 : Le Peyrui - Profils PE2 (haut) et PE3 (bas) – Coupe de distribution des résistivités électriques.	152
Illustration 107 : Proposition d'interprétation des gammes de résistivité électrique observées en termes d'unité lithostratigraphie et d'altération (voir succession lithostratigraphique complète à l'illustration 28).	152
Illustration 108 : Le Plan - Profil PE1 – Coupe de distribution des résistivités électriques interprétée.	153
Illustration 109 : Le Peyrui - Profils PE2 (haut) et PE3 (bas) – Coupes de distribution des résistivités électriques interprétées.	154

Illustration 110 : Secteur du Plan – Position du profil PE1 et de la discontinuité verticale observées sur la coupe sur la carte géologique et structurale de la zone.....	155
Illustration 111 : Secteur du Peyrui – Vue 3-D des coupes de résistivité des profils PE2 et PE3 et interprétation structurale.	156
Illustration 112 : Extraction des vitesses sismiques Vs (MASW) le long du forage SC1 situé sur la RD19.	158
Illustration 113 : Extraction des vitesses sismiques Vs (MASW) le long du forage SC2 situé sur la RD19.	159
Illustration 114 : Carte de l'épaisseur des terrains dont les vitesses $V_s < 300$ m/s. Cette carte a été produite à partir des résultats MASW obtenu avec les dispositifs à 0,5 m de distance inter-capteurs.	160
Illustration 115 : Représentation de la variation de l'épaisseur des terrains à différents seuils de Vs en fonction de la note moyenne de la vulnérabilité du bâti associée. (a) : $V_s < 200$ m/s ; (b) : $V_s < 300$ m/s ; (c) : $V_s < 350$ m/s ; (d) : $V_s < 425$ m/s ; (e) : $V_s < 600$ m/s.	161
Illustration 116 : Visualisation de la zone où les fortes valeurs de vulnérabilité sont associées à une surépaisseur de terrains à $V_s < 300$ m/s (entre les abscisses 65 et 90 du profil P1).	162
Illustration 117 : Coupes sismiques des Vs (MASW, haut), des Vp (réfraction, milieu) et image en réflexion (bas) le long de la Rue Jean Jaurès – RD19. Légende des log géologie : vert = argiles ; bleu clair : argiles gypseuses.	163
Illustration 118 : Extraction des vitesses sismiques Vp (réfraction) le long du forage SC1 situé sur la RD19.	164
Illustration 119 : Extraction des vitesses sismiques et Vp (réfraction) le long du forage SC2 situé sur la RD19.	165
Illustration 120 : Coupe interprétative réalisée à partir de la coupe des vitesses sismiques Vp obtenue le long de la RD19.	166
Illustration 121 : Découpages de la commune de Bargemon en grandes zones homogènes (sur fonds de carte géologique BRGM).	173
Illustration 122 : Présentation de la démarche d'évaluation de l'aléa mouvement de terrain lié à la dissolution du gypse (Source : Guide Aléa Gypse).	175
Illustration 123 : Grille des intensités (guide «Aléa Gypse »).....	176
Illustration 124 : Grille de détermination de la prédisposition (modifiée par rapport au « Guide Aléa gypse »).....	177
Illustration 125 : Détermination des niveaux d'aléa ici appelés niveaux de sensibilité.	177
Illustration 126 : Estimation des niveaux d'intensité par famille typologique des grandes zones homogènes.....	181
Illustration 128 : Détermination des niveaux globaux de sensibilité selon la typologie des grandes zones homogènes concernées.....	182
Illustration 127 : Estimation de la prédisposition de base par famille typologique des grandes zones homogènes.....	182
Illustration 129 : Zonage de la sensibilité mouvement de terrain lié à la dissolution de gypse sur la commune de Bargemon (Var) à l'échelle 1/25 000 (Source fond de carte : Scan 25 IGN).	187

Illustration 130 : Zoom à hauteur du centre bourg sur le zonage de la sensibilité mouvement de terrain lié à la dissolution de gypse sur la commune de Bargemon (Var) (Source fond de carte : Scan 25 IGN).....	188
Illustration 131 : Nombre de bâtiments concernées par niveau de sensibilité sur la commune de Bargemon (83).....	188

Liste des annexes

Annexe 1 : Description des événements d'effondrement, d'affaissement et de glissements de terrain potentiellement liés à la dissolution du gypse, sur Bargemon et aux alentours	199
Annexe 2 : Campagnes de mesure de la conductivité électrique des eaux	225
Annexe 3 : Coupe géologique et technique du forage AEP du Stade	231
Annexe 4 : TRE – Méthode, traitements, modélisation et résultats bruts	235
Annexe 5 : Imagerie sismique	247
Annexe 6 : Coupes de vitesses Vs (sismique MASW).....	259
Annexe 7 : Modèle sismique 3-D.....	269
Annexe 8 : Rapport d'étude géotechnique Hydrogéotechnique « réalisation de deux sondages carottés »	275

Documents hors texte

Planche hors texte n°1 : Carte informative au 1/10 000

Planche hors texte n°2 : Carte de sensibilité au 1/10 000

Document A4 résumant les conclusions de l'étude et recommandations

1. Contexte général

1.1. CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

La commune de Bargemon est concernée par les problèmes de dissolution du gypse depuis de nombreuses années. En 1992 notamment, l'événement du Peyrui a engendré la formation brutale d'un cratère de plusieurs dizaines de mètres de diamètre et de profondeur à proximité immédiate de bâtiments d'habitations. Auparavant, l'effondrement de Favas (il y a environ 100 ans) ou la formation du « trou de Jubille » avaient déjà été constatés et avaient occasionné des dommages. Depuis les années 1970, des désordres structuraux atteignent certains bâtis du cœur de village¹. Ces désordres semblent s'être aggravés depuis environ 10 ans, affectant des bâtiments dans leur intégrité structurelle et engendrant un péril pour les habitants et les riverains concernés (autour des rues Marceau et Maurel en particulier).

Suite à l'effondrement du Peyrui, un PPR mouvements de terrain a été approuvé en 1996, identifiant ce secteur comme zone inconstructible. Plus récemment, consécutivement aux constats d'évolution des désordres en centre-ville, la commune de Bargemon a initié des travaux de reconnaissance pour connaître les origines possibles des désordres observés et les mesures conservatoires pouvant être prises en première urgence². Ces travaux (investigations géotechniques et géophysiques par radar) ont montré que les immeubles affectés reposaient sur des terrains déconsolidés et susceptibles de renfermer des vides souterrains (anomalies géophysiques) à faible profondeur (moins de 10 m). La valorisation de ces résultats proposait des solutions de gestion du risque avec en particulier : la réhabilitation ou démolition des bâti affectés et la création d'un bassin régulateur de rétention des eaux.

À la lumière de ces constats liés aux événements passés et actuels, le risque effondrement-affaissement associé au phénomène de dissolution de gypse dépasse le simple cadre de la zone du Peyrui ou des immeubles récemment touchés au cœur de ville sur la commune de Bargemon. À ce titre, afin de bâtir une stratégie globale de gestion du risque affaissement-effondrement lié à la dissolution de gypse, la commune de Bargemon a sollicité le BRGM pour proposer un programme de travail permettant une meilleure identification locale des phénomènes en jeu et de leur ampleur, et une première cartographie préliminaire de la sensibilité mouvement de terrain lié à la dissolution du gypse à l'échelle du 1/25 000 afin d'aboutir à la mise en œuvre de solutions adaptées à l'ampleur des phénomènes, et ce sur l'ensemble de la commune.

1.2. MÉTHODOLOGIE

Le programme proposé vise à analyser le phénomène de dissolution de gypse à l'échelle communale et de proposer les solutions de gestion du risque adapté au contexte local en aboutissant à la formulation d'actions concrètes intégrant la sensibilité et vulnérabilité des enjeux exposés.

L'organisation générale des travaux prévus est rappelée ci-dessous :

- analyse de susceptibilité aux effondrement-affaissement liés à la dissolution de gypse à l'échelle communale. Ce volet comprendra en particulier :

¹ Témoignage Mairie (juillet 2015): église ayant nécessité des confortements (1973-74)

² Rapport LERIT (24/11/2014)

- une analyse détaillée des contextes géologique et hydrogéologique au regard de la spécificité du phénomène à aborder,
- la collecte, l'analyse et la structuration des mouvements de terrain et des dommages associés au phénomène.

Ces analyses seront basées sur des relevés et enquêtes de terrain, l'acquisition de données de site (conductivité des eaux de surface et en profondeur par exemple), le traitement et l'analyse de données d'imagerie notamment (interférométrie radar).

- gestion du risque affaissement-effondrement lié à la dissolution de gypse à l'échelle du cœur de ville. Ce volet comprendra en particulier :
 - la définition de la géométrie des formations présentes en profondeur à partir de synthèses existantes et d'acquisitions spécifiques (notamment un test expérimental de trois méthodes géophysiques pour identifier les plus adaptées au contexte, suivie d'une campagne géophysique complète);
 - une analyse détaillée de la typologie des désordres constatés intégrant en particulier la vulnérabilité des ouvrages concernés
 - la précision locale de la gestion des eaux de ruissellement et d'infiltration au voisinage des désordres constatés.

In fine, ces travaux ont abouti à la fourniture, pour le bâti en particulier, d'une carte de sensibilité hiérarchisée pour le phénomène effondrement-affaissement sur le quartier et la proposition de solutions de gestion du risque adaptées (prévention, protection et mesures de sauvegarde).

1.3. MOYENS MIS EN ŒUVRE

Compte tenu de la complexité du phénomène considéré, l'analyse est pluri disciplinaire intégrant géologie et géotechnique, hydrogéologie et hydrologie, géophysique et ingénierie des structures.

Ces travaux thématiques ont été réalisés de manière à ce que les résultats obtenus par les premiers travaux nourrissent la réflexion et alimentent les décisions à prendre pour la mise en œuvre des actions qui ont suivi.

Ainsi, la première analyse interférométrie radar satellitaire avait pour objectif d'orienter les analyses en identifiant de manière assez large sur la commune les zones éventuelles de mouvement de terrain, en utilisant une carte de vitesse représentant la déformation du sol, sans pouvoir distinguer les mouvements horizontaux (glissement, fluage) des mouvements verticaux (tassement par exemple).

Ces premiers résultats ont permis d'orienter les investigations géophysiques qui ont suivi.

Les investigations géologiques et hydrogéologiques sur l'ensemble de la commune ont permis d'établir un modèle géologique et hydrogéologique pour mieux comprendre le rôle lithologique et structural dans le phénomène de dissolution, ainsi que l'hydrogéologie locale et le fonctionnement hydrogéologique des aquifères. Ces informations ont ainsi guidé l'ensemble des investigations qui ont suivi

L'étude de la vulnérabilité du bâti via un inventaire précis des désordres en surface a permis de confirmer ou non les résultats précédents, en associant un désordre à une cause de dissolution

Enfin, le choix de deux méthodes d'imagerie géophysique proche surface (électrique et sismique) a été fait parmi un certain nombre d'outils disponibles, afin de répondre aux questionnements mis en évidence précédemment, en renseignant notamment sur la nature et la géométrie des terrains auscultés et sur la variation des paramètres géomécaniques des terrains, pour fournir des contraintes sur leur état (altération, saturation...). La microgravimétrie a été abandonnée suite aux repérages pour les raisons suivantes :

- absence d'un modèle numérique de terrain (MNT) local suffisamment résolu pour le calcul des corrections de terrains
- l'étroitesse des rues dans le centre bourg qui n'aurait pas permis de réaliser un levé correct.

Ces deux points auraient conduit à des incertitudes très élevées sur une quelconque anomalie gravimétrique résiduelle. Sachant que la microgravimétrie était proposée pour identifier des vides dans le centre village, on s'attendait donc à des anomalies de l'ordre de quelque μGal . Le risque d'incertitudes proches ou supérieure aux anomalies recherchées était trop grand.

Les résultats des deux méthodes appliquées (électrique et sismique) ont néanmoins permis de localiser au mieux les deux forages de contrôle réalisés dans le cadre du projet par la Mairie de Bargemon, de comprendre davantage les mécanismes du fontis du Peyrui, et de formuler des hypothèses sur la composition géologique et les phénomènes en jeu au niveau du cœur de village

2. État des connaissances sur les effondrements liés à la dissolution du gypse sur Bargemon et aux abords de la commune

La connaissance sur les événements d'effondrement sur le secteur de Bargemon est riche et plusieurs études ont été réalisées sur ces phénomènes naturels depuis plus d'une vingtaine d'années, en particulier depuis l'effondrement du Peyrui en 1992 (Illustration 1), dans l'objectif de mieux comprendre ce qui l'avait provoqué.



Illustration 1 : Aperçu de l'effondrement du Peyrui de 1992 (photo DDTM83).

Ce chapitre va aborder à la fois la bibliographie réalisée au cours de l'étude, et un descriptif des événements connus d'effondrement ou d'affaissement suspecté dans la région de Bargemon (qui sont détaillés en Annexe 1).

La carte présentée page suivante (Illustration 2) est une carte informative de tout ce qui a pu être observé lors de l'étude

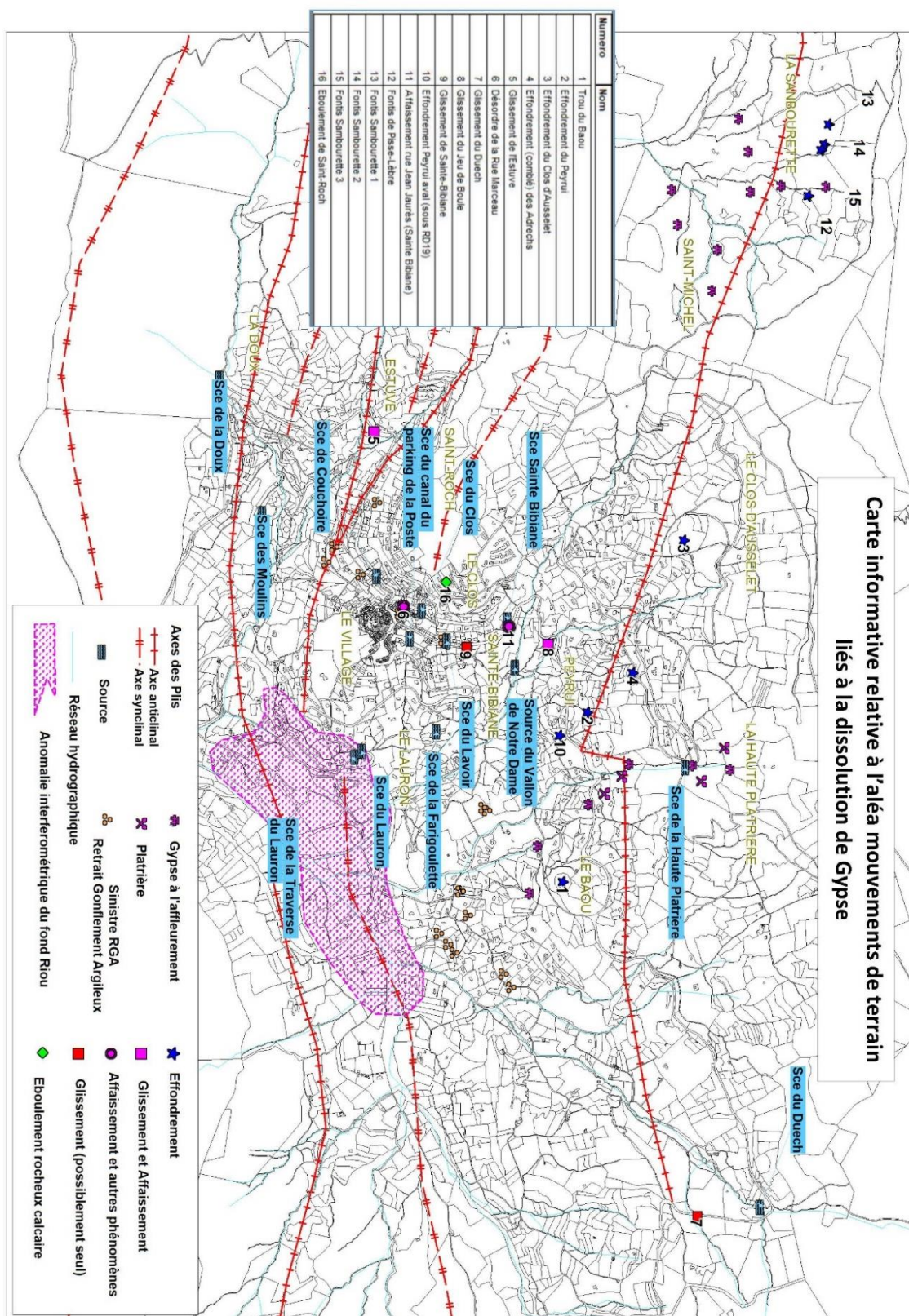


Illustration 2 : Carte informative mouvements de terrain liés à la dissolution de Gypse.

2.1. TYPOLOGIE DES MOUVEMENTS DE TERRAIN LIÉS À LA DISSOLUTION DU GYPSE

Pour une meilleure compréhension des événements décrits juste ci-dessous dans l'étude bibliographique, il apparaît nécessaire dans ce rapide préambule de présenter rapidement sous forme de schémas les deux typologies possibles de mouvements de terrain liés à la présence de cavités souterraines créées par la dissolution du gypse, à savoir les affaissements et les effondrements.

Dans les deux cas, il s'agit d'une migration des vides présents de la cavité souterraine jusqu'à venue au jour du fait de la chute gravitaire des éléments des terrains du recouvrement situés au-dessus de la cavité initiale.

Dans le cas des **affaissements**, les terrains de recouvrement sont mécaniquement peu résistants (absence de niveau de "banc raide") empêchant le maintien ouvert de cavités franches. La migration des vides vers la surface engendre un fléchissement des terrains de couvertures selon une dynamique lente et de manière progressive, et généralement synchrone de création de nouveau vide (cavitation) par dissolution du gypse (Illustration 3). Une fois la surface atteinte, une cuvette topographique apparaît et se développe lentement (extension de l'emprise au sol et surtout accentuation de la profondeur de cuvette). En bordure de cuvette, des efforts de flexion, de traction et de cisaillement, et des tassements différentiels peuvent se manifester, avec parfois présence de fractures ouvertes.

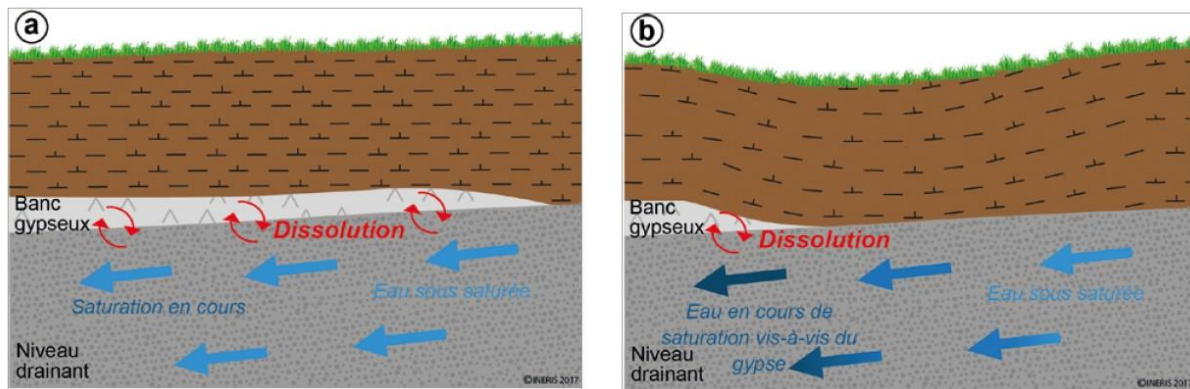


Illustration 3 : Schéma d'apparition d'une cuvette d'affaissement (d'après "le guide Aléa Gypse"³).

Dans le cas des **effondrements** (Illustration 4), la présence au toit de la cavité d'horizons mécaniques raides (ou de la cloche de fontis créée par les vides en cours de migration) bloque un temps la migration vers la surface, jusqu'à ce que le vieillissement naturel de celui-ci (accentué par la mise en porte-à faux du toit sous le poids du recouvrement) finisse par rompre brutalement. La venue au jour des vides de la cloche de fontis se fait à terme de manière plus ou moins brutale, avec progression souvent par à coup du cratère d'effondrement créée et laissée ouverte (extension de l'emprise au sol notamment avec fissures périphériques au sol puis évasement des bords, accentuation de la profondeur du plancher d'effondrement).

³ Document présenté en début de chapitre 5

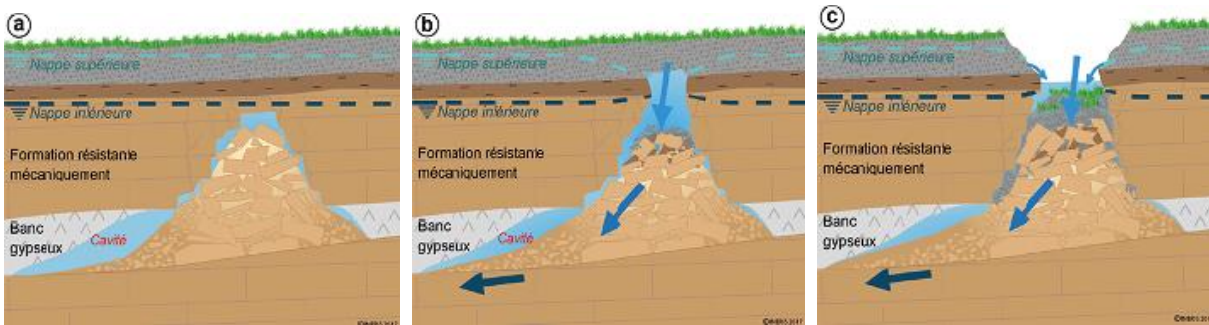


Illustration 4 : Schéma d'apparition d'un effondrement (d'après le "guide Aléa Gypse").

2.2. ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Cairon D. et Dellery B., en 1990⁴, ont étudié les effondrements observés en surface sur la commune de Bargemon correspondant à la formation de dolines. L'étude explique que ces dolines sont nées lors de l'effondrement partiel du toit d'une galerie karstique. Ce phénomène est d'autant plus ressenti à la surface que d'une part, la galerie est moins profonde et que, d'autre part, les terrains qui la recouvrent sont susceptibles de s'effondrer (terrains meubles ou fracturés). Le réseau karstique se développe à travers les réseaux de fractures (failles, diaclases) qui affectent les massifs calcaires ou dolomitiques du Jurassique et du Trias (Keuper et Muschelkalk). *A priori*, il est donc possible de considérer les zones de passage de linéaments et les zones à forte densité de fracturation (déduite des linéaments) comme des zones susceptibles d'être parcourues par des karsts et donc comme des zones à plus fort potentiel d'effondrement. Par ailleurs, le Keuper et les formations alluviales sont également susceptibles d'être affectées par le risque d'affaissement. Il s'agit de la possibilité d'affaissement de niveaux meubles ou non compactés du sous-sol (tels le gypse du Keuper) ou bien provoqués par des phénomènes de dissolution.

La thèse de Nicod⁵ mentionnait déjà le fait que les entonnoirs observés se situaient au voisinage des anticlinaux pincés de Muschelkalk (étage d'âge géologique), du creusement des vallées, qui abaisse la zone de circulation phréatique, et lui permet d'attaquer de nouvelles zones gypseuses, des travaux miniers enfin (plâtrières).

Leroi E. en 1992⁶ a examiné des photographies aériennes antérieures au phénomène du Peyrui de 1992, et a montré que le site correspondait à un ancien vallon, propice à la concentration des eaux. Au cours des 50 dernières années (avant le fontis du Peyrui en 1992), de nombreuses modifications du réseau de drainage superficiel, et par conséquent souterrain, sont intervenues dans le secteur. L'ancienne exploitation de gypse avait été implantée sur l'exutoire d'un bassin versant relativement important ; l'existence d'un ancien collecteur de gros diamètre, collecteur actuellement obstrué, en est la preuve ; de plus, la route actuelle est construite sur un remblai constitué en partie par les résidus d'exploitation de la carrière ; or il existait par le passé un pont à la place de ce remblai, pont qui enjambait un cours d'eau pérenne. L'obstruction de l'exutoire est d'ailleurs confirmée par le fait que, les eaux se concentrent derrière l'exploitation et se mettent

⁴ Cairon D. et Dellery B. (1990) – Périmètre des terrains soumis aux risques naturels à Bargemon (83). Rapport BRGM/R 31793 PAC 4S 90. 15 p

⁵ Nicod J. (1967) - Recherches morphologiques en Basse-Provence calcaire. Thèse de Doctorat d'État, Aix-en-Provence, Édit. Louis-Jean, Gap, 557 p.

⁶ Leroi E. (1992) – Effondrement de Bargemon (Var), utilisation du kit d'urgence d'auscultation. Rapport BRGM/R 35894. 71 p

en pression dans le versant à la suite d'orages violents. Plusieurs hypothèses sur le mécanisme de rupture ont pu être avancées dans cette étude :

- suite aux orages et aux pluies importantes survenues le week-end précédant l'effondrement, les eaux auraient continué à éroder les parois d'une cavité en équilibre précaire, et les éboulements successifs, auraient conduit à une déstabilisation de l'ensemble ;
- dans le second cas, les eaux issues des mêmes orages, se seraient accumulées dans une cavité préexistante, et un phénomène de vidange rapide dû à un « débouillage » de l'exutoire aurait provoqué un appel au vide conduisant à l'effondrement du toit de la cavité. L'eau libérée aurait-elle alimenté un cours d'eau existant ? Se serait-elle perdue dans d'éventuelles cavités connexes ?

Des travaux communs du CETE, LCPC (1996-1997)⁷ ont analysé les anomalies morphologiques liées aux désordres. Celles-ci ont été recherchées principalement dans :

- les structures circulaires : celles-ci sont liées soit à des effondrements déclarés soit à des affaissements qui peuvent évoluer dans certains cas vers un effondrement. Les anomalies peuvent correspondre aussi à des dépressions aux bords abrupts (exploitation ou puits) ou des tassements consécutifs à la formation de vides sous-jacents. Très souvent les anomalies circulaires sont emboîtées ; elles traduisent alors le plus souvent une évolution latérale d'un fontis (augmentation du diamètre du cône d'effondrement) ;
- les structures tectoniques : la présence de gypse dans les terrains (cavités potentielles) est liée aux structures tectoniques. Le front des nappes de charriage est par exemple le siège des bourrages de gypse. Deux masses de gypse peuvent être isolées de la strate de départ dans certaines charnières de plis anticlinaux. Des niveaux de gypse peuvent être aussi injectés dans des accidents de type pli faillé (décollement). La fracturation a également un rôle déterminant dans la genèse des cavités souterraines naturelles. Les accidents et failles subméridiennes (fracturation régionale) constituent en effet des drains privilégiés de l'aquifère vers les formations gypseuses très solubles du Trias. Se superposant à la fracturation d'échelle régionale, la fracturation radiale témoigne du poinçonnement vertical d'une intumescence ou intrusion salifère. La localisation de cette fracturation indique la présence en profondeur d'un diapir de gypse ipso facto des vides plus importants dans ces secteurs ?

Puis ce sont les travaux de Pothérat en 1997⁸ qui se concentrent à nouveau sur le secteur de Bargemon. Il décrit que les entonnoirs ou dolines recensés en Basse Provence sont ouverts généralement dans les terrains argilo-gypseux du Keuper (clapes de Draguignan et de Callas, effondrement de Peyrui à Bargemon). On peut tirer des informations importantes de la disposition des entonnoirs. Créés par dissolution du gypse du Keuper puis par effondrements successifs, ces entonnoirs sont rapidement colmatés par des matériaux soliflués (provenant essentiellement des formations superficielles) et deviennent alors des « dolines » ou des ouvalas (coalescences de dolines). L'entonnoir dont l'effondrement est actif est le plus bas : ce qui témoigne de la circulation aquifère, facteur de dissolution de CaSO_4 .

Pothérat poursuit sur l'analyse de cinq anciens effondrements répertoriés au nord de Bargemon. Tous de forme circulaire, ils ont l'apparence, soit d'une dépression à bords abrupts (type trou du

⁷ Guennet, B., Effondrement de terrain à Bargemon, quartier Peyrui, interprétation du suivi topographique de septembre 1992 à février 1997, CETE méditerranée, mars 1997 ; LCPC-CETE d'Aix-en-Provence (1996), Etude photo-interprétative appliquée à la détection de zones à effondrements potentiels. Le Trias provençal de Fayence à Draguignan (Var), rapport de recherche

⁸ Pothérat (1997) Etude par photo-interprétation des phénomènes d'effondrement liés à la dissolution du gypse – Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées – 209 – Mai-juin 1997. Réf 4126 – PP. 69-81

Baou), soit d'une doline à fond plat. Ces structures circulaires, facilement repérables sur les photographies aériennes, sont toutes traversées par un ou plusieurs accidents qui semblent matérialiser, en surface, la trace du réseau karstique profond (Illustration 5). L'examen approfondi des photos met en relief la présence d'autres structures circulaires, plus ou moins emboîtées, réparties en deux groupes dans les secteurs du Peyrui (A) et du Clos d'Ausselet (B), où l'on a suspecté la présence de phénomènes d'halocinèse. Elles correspondent soit à d'anciens effondrements comblés, généralement à fond plat, soit à des tassements consécutifs à la formation d'un vide sous-jacent. A l'emplacement du trou du Peyrui, une structure circulaire, visible sur les photos de 1979, est située à l'intersection de deux discontinuités d'azimuts N10-20° E et N160-170° E également détectées par les méthodes géophysiques. Un effondrement s'est donc déjà produit à cet endroit. Il s'agit vraisemblablement d'un phénomène polycyclique : la direction de la contrainte régionale principale (al) n'ayant pratiquement pas varié depuis la phase majeure alpine : raccourcissement « Z » nord-sud, les fractures subméridiennes sont toujours restées ouvertes et on s'accorde à penser que les processus de dissolution/effondrement ont joué de façon pérenne depuis plus de 10 millions d'années (anté-Vindobonien).

La dissolution du gypse du Muschelkalk moyen et du Keuper, rapide dans un premier temps en raison de sa forte solubilité, a présidé au large développement d'un karst dont l'effondrement du toit a entraîné la formation de brèches calcaires et dolomitiques du Muschelkalk supérieur ou des terrains surincombants, ainsi que nous le voyons dans l'ancienne carrière de la plâtrière où des brèches polygéniques comblent une ancienne cavité de dissolution intra-gypseuse (Immédiatement au nord et à l'est de l'effondrement de 1992, deux structures circulaires bien marquées coïncident avec des anomalies gravimétriques négatives et doivent faire l'objet d'une grande attention.

La géométrie de l'aquifère karstique est subordonnée aux directions de fractures subméridiennes sollicitées en traction par la contrainte régionale : près de Figanières, dans le talus de la route, des fissures ouvertes de direction N20° E, tapissées de calcite, témoignent du jeu de la contrainte actuelle et des phénomènes de dissolution/recristallisation associés. Il était raisonnable de penser que les vides à l'origine des effondrements récents seraient étroits et allongés selon cette direction, ce qui a été confirmé par la campagne de forages et par la géophysique. Outre les cinq anciens effondrements identifiés à Bargemon, de nombreux autres événements du même type ont pu être repérés près de Draguignan. Leurs diamètres varient de 20 m à 200 m (trou du Baou à Bargemon). De forme circulaire, ces effondrements présentent une bordure généralement raide, voire abrupte. Dans ces mêmes secteurs, des structures circulaires ou en arc de cercle témoignent d'une instabilité du sous-sol en relation avec des processus de dissolution. Il s'agit soit d'anciens effondrements comblés, soit d'affaissements qui peuvent représenter des effondrements potentiels.

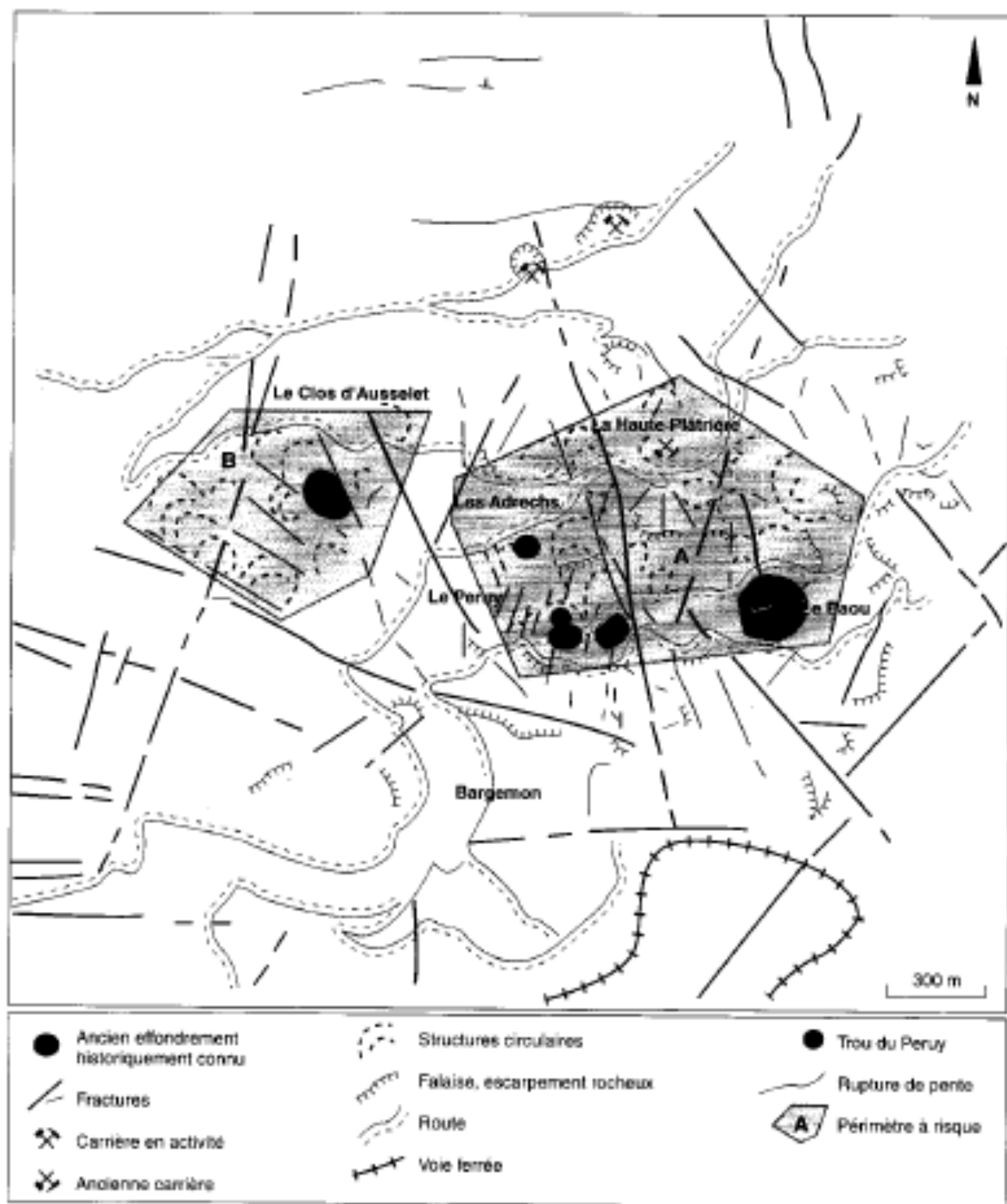


Illustration 5 : Extrait du rapport de Pothérat (1997) montrant une esquisse structurale de la région de Bargemon d'après photo-interprétation (Mission IGN, 1979 à 1/14 500, cliché n°3007).

Le report des anciens effondrements et des anomalies circulaires sur une carte structurale met en lumière leurs relations spatiales avec les différents objets tectoniques (Illustration 6). Les effondrements surviennent préférentiellement le long des axes de plis anticlinaux, caractérisés par de fréquents bourrages de gypse dans leur charnière. Les bourrages de gypse évoluent parfois en pseudo diapirs décelables grâce à des fractures rayonnantes caractéristiques d'une poussée verticale. Les effondrements sont dans leur grande majorité associés à ces fractures et aux axes anticlinaux. Leur nombre décroît quand on s'éloigne de ces axes. Les fractures subméridiennes étant restées ouvertes, depuis plus de dix millions d'années sous l'action de la contrainte régionale principale, les phénomènes de dissolution/effondrement se sont développés le long de ces directions. Une étroite corrélation spatiale est logiquement observée entre cette famille de fractures et les effondrements : le trou du Peyrui est situé à l'intersection de deux discontinuités d'azimuts N10° E et N160° E, le trou de Tourettes est situé sur une fracture nord-sud empruntée par le ruisseau du Chautard. Nous pouvons remarquer que les secteurs qui comptent le plus d'effondrements et de structures circulaires sont remarquables par une fracturation nord-sud très développée.

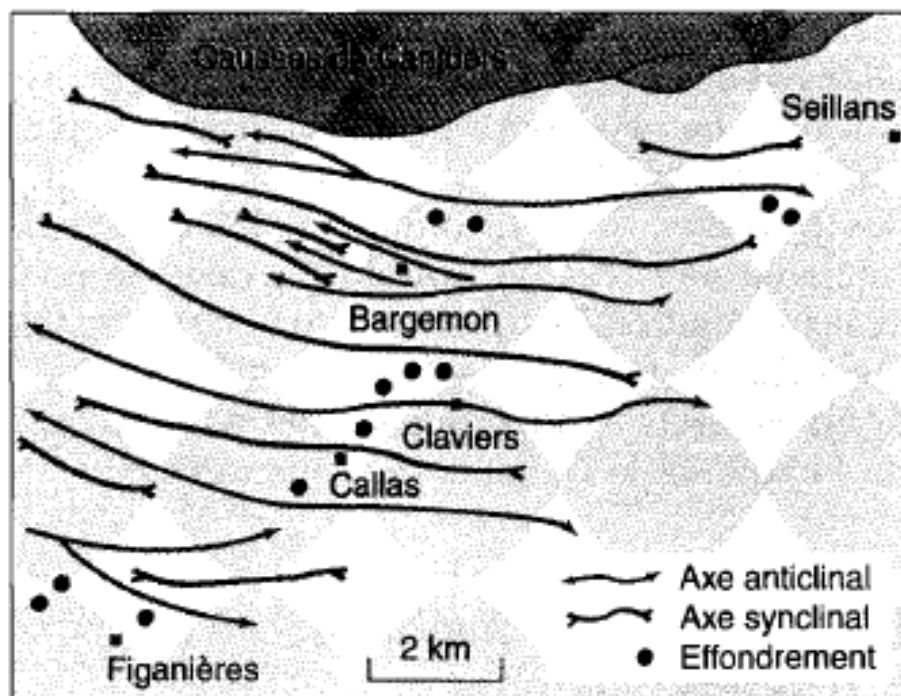


Illustration 6 : Relations spatiales entre les axes de plis et les effondrements de Figanières à Seillans, d'après l'article BLPC 209 pp 69-81 Pothérat (1997).

Pothérat conclura dans ses travaux que l'occurrence de phénomènes de dissolution/effondrements associés au karst triasique résulte d'une étroite complémentarité entre facteurs lithologiques, structuraux et hydrologiques (Illustration 7) :

- présence de niveaux de gypse (Keuper) ;
- structures anticlinales pincées (bourrage de gypse) ;
- fractures rayonnantes (diapirisme) ;
- fractures subméridiennes (jouant en extension sous la contrainte régionale nord-sud) ;
- présence d'un aquifère important drainé vers les formations gypseuses.

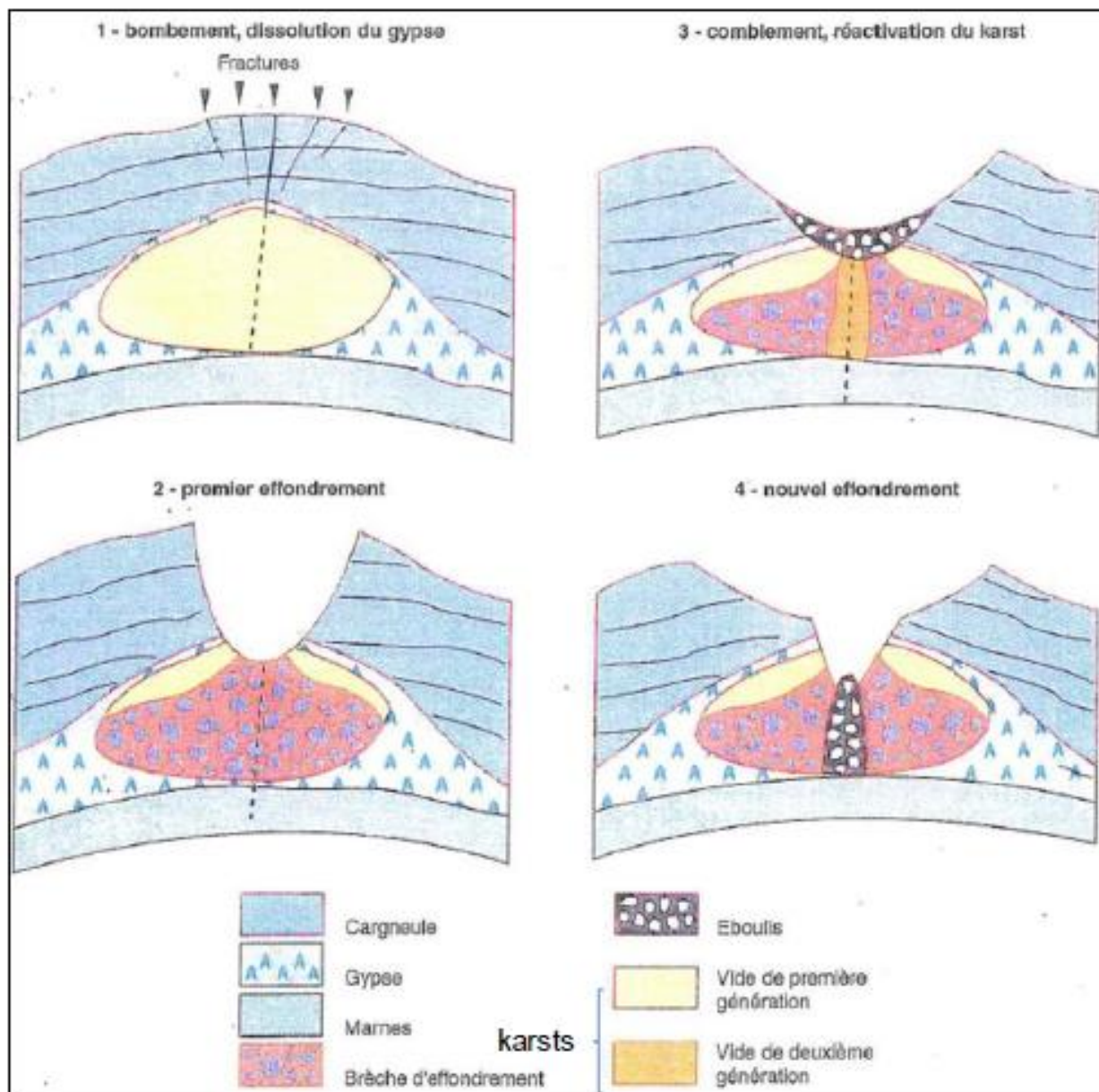


Illustration 7 : Schéma présentant une hypothèse d'évolution polyphasée de cavités de dissolution dans le gypse du Trias de Provence, région de Bargemon, Var (d'après Pothérat, 1997).

Les zones les plus propices aux mouvements de terrain sont caractérisées par la présence de structures annulaires et une fracturation rayonnante visibles sur les photographies aériennes, toujours en relation spatiale directe avec les axes anticlinaux, d'où l'importance de la connaissance de la géologie régionale qui permet d'orienter efficacement les investigations. La technique mise en œuvre lors de cette étude n'est évidemment pas adaptée à la prévision d'effondrements imminents, mais elle permet de circonscrire des secteurs à risque potentiel. Pour préciser la présence de cavités sous les structures circulaires en relation avec des fractures subméridiennes et/ou radiales, compte tenu de la géométrie du réseau karstique, les meilleurs moyens paraissent être la microgravimétrie qui est la méthode la plus performante actuellement

connue et les sondages obliques. Le suivi précis des déformations des routes traversant un secteur à risques représente un autre moyen de repérage des vides sous-jacents.

Dans les années 2000, F. Fiolet revient dans son mémoire de Maîtrise⁹ sur l'étude de l'instabilité d'un versant en milieu méditerranéen, avec l'exemple du versant de Bargemon (Var). Son étude est intéressante pour la description géographique, géologique et géomorphologique du secteur. Il est rappelé que le gypse est issu de la transformation de l'anhydrite, présente à la base du Trias, par hydratation, c'est une roche compacte mais tendre. En raison de son seuil de plasticité très bas, il a une forte aptitude à migrer verticalement notamment sous forme de diapirs, d'où sa présence dans le Keuper. Dans le Keuper, le gypse n'est pas uniforme, il n'a pas le même aspect suivant les endroits bien qu'il se présente toujours sous forme d'affleurement rocheux. Dans ce Keuper, le gypse est un élément important, d'une part par son abondance, attestée par les nombreux affleurements et anciennes carrières, et d'autre part par ses propriétés de roches salifères, à savoir une forte aptitude à la dissolution en présence d'eau. Du fait de son abondance, le gypse va avoir une influence importante sur l'ensemble du versant puisque les effondrements issus de la dissolution du gypse vont par endroit remodeler le versant. Dans son analyse, elle poursuit avec la description des failles qui sont un élément important du versant. Elles ont soit une orientation est/ouest, soit une orientation subméridienne (nord nord-est/sud sud-ouest ou nord-ouest/sud-est). Les failles orientées est/ouest sont dues à la poussée vers le sud qu'ont exercé les chevauchements du domaine alpin au Tertiaire. Ces chevauchements ont fait que Bargemon se situe au cœur de séries d'anticlinaux et de synclinaux, l'érosion différentielle jouant, le Keuper, roche tendre par excellence, a été érodé créant parfois une inversion de relief, avec un synclinal perché comme c'est le cas sur le plan de Favas. Les failles subméridiennes sont les conséquences des premières : les couches ont été poussées vers le sud mais la pression n'a pas forcément été de la même intensité partout, il s'est alors créé des plis sous forme d'écailles encadrées de failles. C'est ce qui s'est produit au Clots Robert. Le Muschelkalk et le Keuper, connus pour être très plastiques sont deux niveaux de décollement de la couverture par rapport à la structure, ce qui a permis la remontée de gypse sous forme de diapir par effet de bourrage. Elle conclut par la constatation d'une forte présence de gypse dans la commune de Bargemon. Au Clots Robert, il est possible d'observer une telle remontée de gypse dans l'une des parois de l'effondrement du Baou : l'ensemble de la roche est du gypse gris et rouge très friable. La structure est chaotique, plissée et microplissée (Voir coupes schématiques issues des travaux de Fiolet F. dans l'illustration 8).

⁹ Fiolet F. (2000) L'étude de l'instabilité d'un versant en milieu méditerranéen, l'exemple du versant de Bargemon (Var) – Maîtrise de Géographie Physique

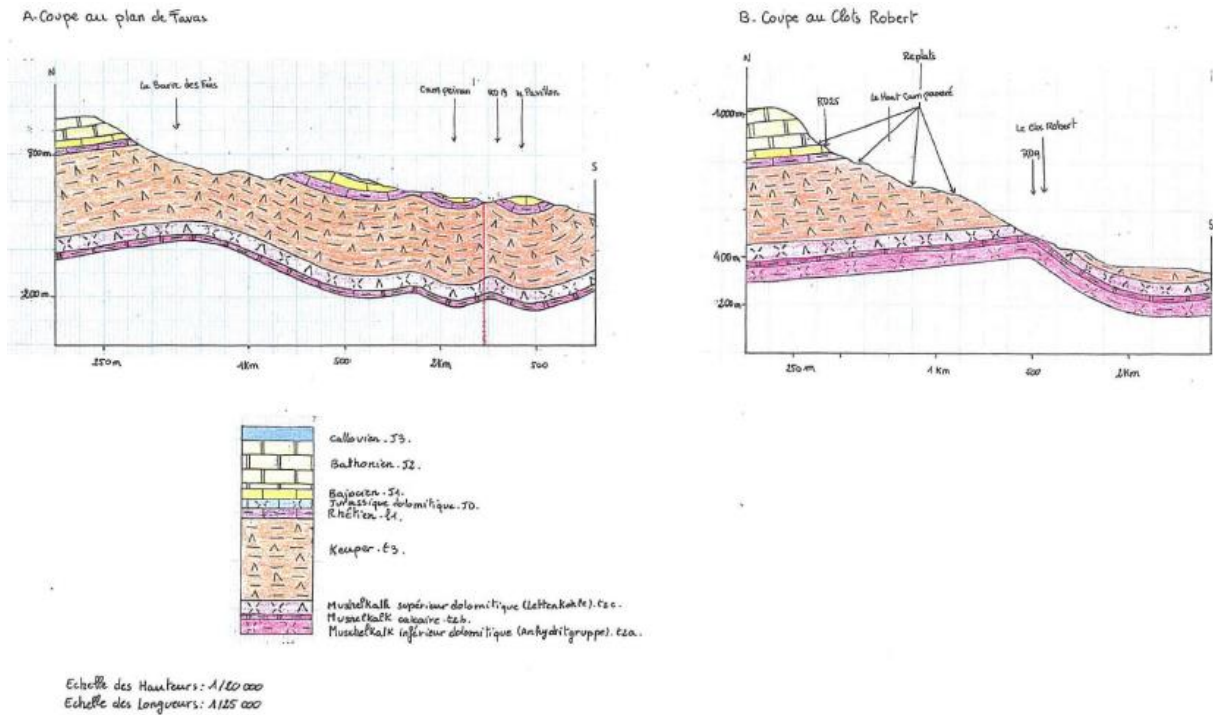


Illustration 8 : Coupes et colonne stratigraphique proposée par F. Fiolet (2000)

La présence de gypse est incontestablement l'élément le plus important. Il est remonté sous forme de diapirs suite au décollement dans les structures anticlinales composées des niveaux du Keuper et de Muschelkalk. La fracturation favorise la mise en place de ces fractures qui n'ont pas changé d'orientation et sont restées ouvertes depuis la phase majeure des Alpes. En effet, les diapirs indiquent une poussée verticale et font que ces fractures se transforment en failles en extension permettant la circulation des eaux sur toute leur longueur et en profondeur. Ainsi, ces eaux ont probablement dissous le gypse dans des volumes assez conséquents. La circulation des eaux a entraîné la succession des processus de dissolution/effondrement depuis au moins le Vindobonien, soit au moins depuis dix millions d'années. Sur ce versant, nous sommes donc en présence d'un karst à fonctionnement polyphasé: tout d'abord, la dissolution s'est effectuée sur deux niveaux: à la fois dans les niveaux gypseux du Keuper et dans les niveaux du Muschelkalk calcaire. Cette dissolution a provoqué la formation de cavités dont le toit s'est effondré. Le toit calcaire s'est effondré et a comblé les cavités sous forme de morceaux qui par la suite se sont cimentés, donnant ainsi des brèches calcaires. Ensuite s'est produite une seconde phase se réduisant à la dissolution de ces brèches calcaires, cette dissolution est beaucoup plus longue puisque les brèches calcaires sont beaucoup moins solubles que le gypse (J-L. Durville, P. Pothérat, 1994). C'est en général dans ces roches que se produisent les effondrements actuels. C'est le long des fractures et des failles, et plus spécialement aux intersections de failles de direction différentes que l'eau circule le mieux, il est donc logique de trouver à ces intersections les cavités les plus importantes et par la même occasion les plus grands effondrements.

Enfin, comme nous l'avons vu, sur le versant, tout effondrement prend la forme d'un entonnoir. Cette forme d'entonnoir a des conséquences énormes sur l'ensemble du versant en remettant en cause sa stabilité. En effet, l'effondrement provoque un vide qui entraîne le phénomène d'appel au vide, amplifié par la pente du versant, qui se traduit par des risques de glissements en amont de l'effondrement en plus d'un élargissement de tous les côtés suite à des petits glissements. Ces mouvements de terrain se continueront jusqu'au réajustement de la pente d'équilibre, voisine de 30°. Cette forme d'entonnoir touche donc une surface très importante, beaucoup plus grande que l'effondrement par lui-même : au Peyrui, l'effondrement fait une centaine de mètres de

diamètre mais un glissement risque de se produire jusque 250 m en amont et des fissures sont visibles actuellement jusque au moins 20 m du bord de l'effondrement, ce qui élargit considérablement le périmètre touché par l'effondrement. Cette forme d'entonnoir est une nouvelle fois la preuve d'une étroite relation entre les effondrements et les glissements.

Les exemples décrits d'événements décrits dans le chapitre suivant montrent qu'il existe une relation étroite entre les glissements et les effondrements. Cette relation s'exprime de deux façons soit par la dissolution du gypse comme au glissement/affaissement de l'Estuve où la formation de cavités en profondeur entraîne une rupture semi-circulaire sur la route qui par la suite part en glissement; soit à la suite d'un effondrement comme c'est le cas au Peyrui où l'effondrement a provoqué le déséquilibre du versant qui se réajustera avec le glissement qui est susceptible de se produire en amont si aucun aménagement n'est fait.

Dans les Alpes-Maritimes cette fois, des travaux intéressants de Thèse de Swann Zerathe (2013)¹⁰ montrent sur le secteur du Bassin de Grasse une zone de Keuper qui n'apparaît plus du tout stratifié. Les niveaux de gypses sont tectonisés et injectés à la base des grands accidents N20-40° produisant aujourd'hui de véritables linéaments d'effondrements. À cet endroit les niveaux dolomitiques stratifiés ont disparu et l'ensemble du Keuper est dominé par 200 m d'argiles remaniées et tectonisées incluant des petits blocs de dolomies. Le Keuper présente des caractéristiques similaires de celui de Bargemon (fortement déstructuré) à la base des chevauchements subalpins mais son épaisseur y est plus variable, de 10 à 200 m en fonction du contexte local. C'est dans ce niveau stratigraphique particulier que s'initie l'ensemble des grands mouvements de versants étudiés au cours de ce travail de thèse (Illustrations 9 et 10).

¹⁰ Zerathe S. (2013) Origine et évolution des ruptures gravitaires de grande ampleur dans les chaînes subalpines méridionales à l'Holocène Contraintes géomorphologiques, géochronologiques et géophysiques

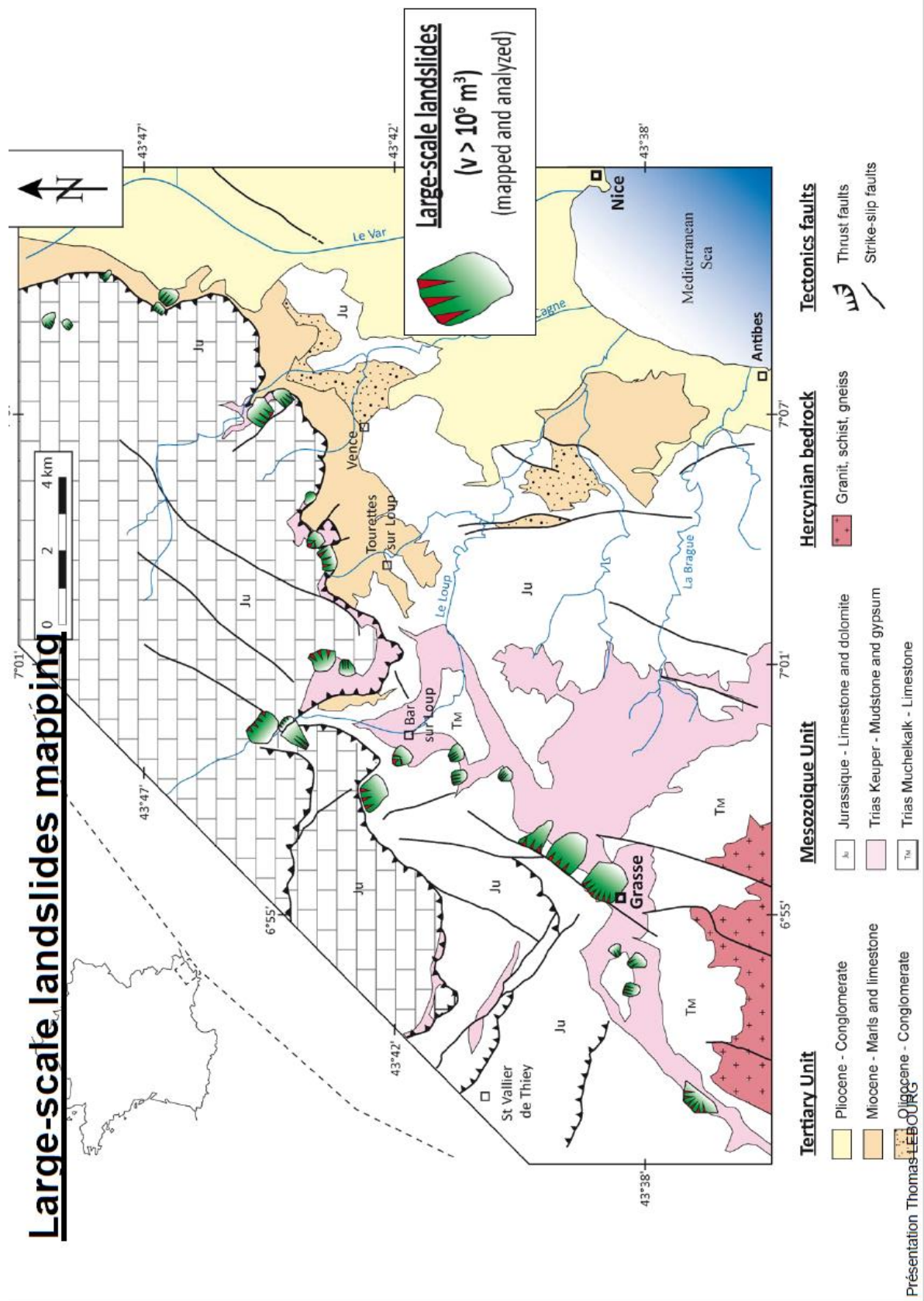


Illustration 9 : Carte régionale des glissements de terrain (Lebourg, Zerathe (2013)).

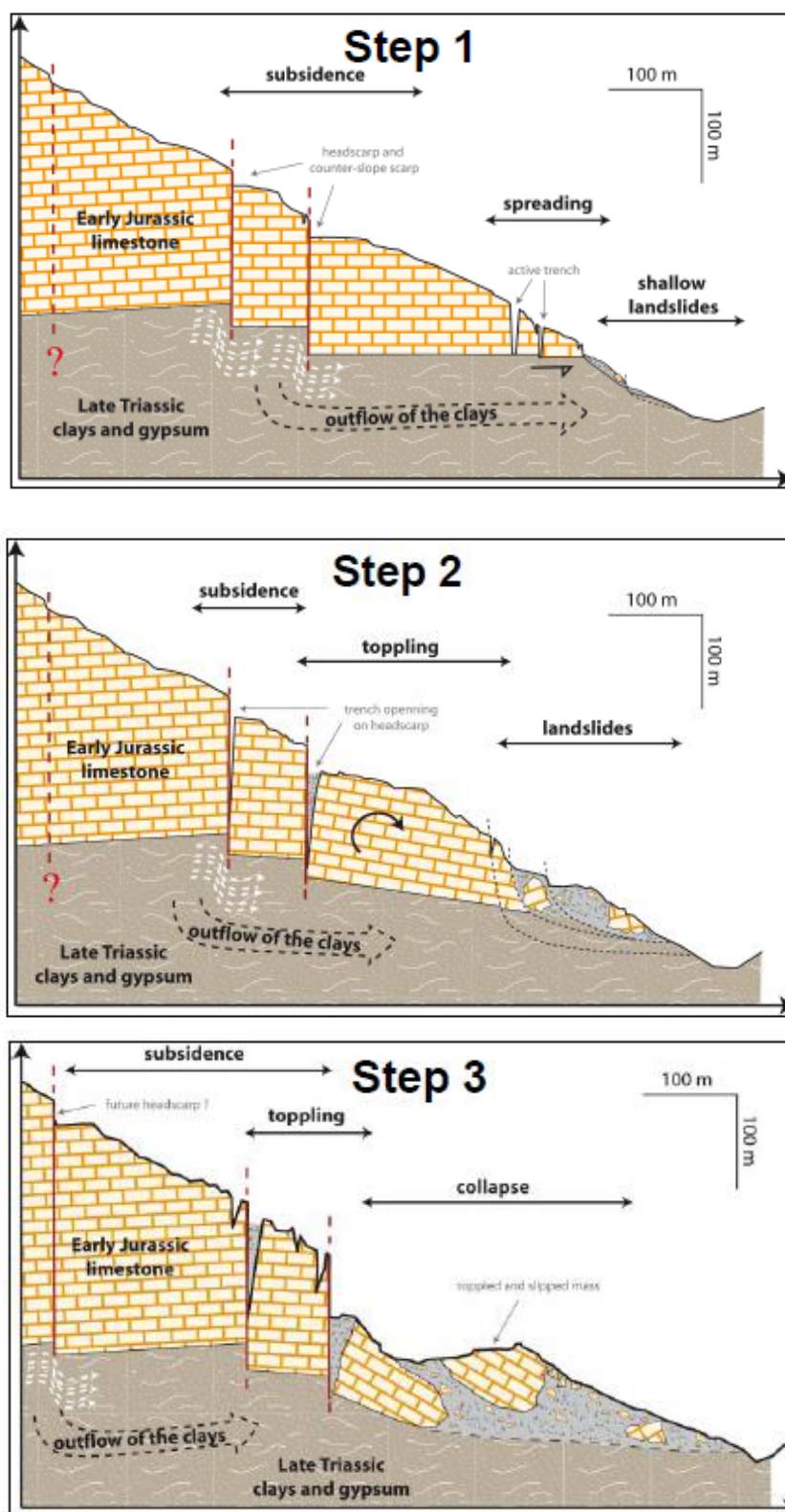


Illustration 10 : Proposition d'un modèle cinématique du glissement de terrain en profondeur (Lebourg, Zerathe (2013)).

Un autre secteur va ensuite être étudié plus tard dans les années 2002, il s'agit du centre du village où un effondrement rue Marceau et rue François Maurel, de date inconnue est visible depuis les années 1970, par le biais de désordres structuraux atteignant certains bâtis du cœur de village et s'aggravant depuis 2009. La profondeur de la cavité initiale serait de 10 m. Sont observés des mouvements d'enfoncement et de basculement des immeubles. Un risque de tassement général de la zone est mis en évidence. En sous-sol, il est décrit la présence de gypse et circulations d'eau (puits, anciennes canalisations). Enfin, des dommages au bâti avec risque de chutes d'éléments de façades sont décrits dès les années 2009/2011.

D'après l'expertise du BRGM en 2011 (rapport BRGM/RP-60536-FR par Rivet et Mathon, 2011)¹¹, des désordres étaient observés depuis des années par les habitants et les représentants de la mairie dans le centre-bourg de Bargemon, mais ceux-ci se sont aggravés depuis 2009. Ces désordres menacent directement la structure de plusieurs immeubles du centre-ville. Les lézardes observées sur les façades montrent un mouvement d'affaissement des immeubles, dans les rues Marceau et Maurel (Illustrations 11 et 12). Ailleurs dans le centre-ville, des fissures sont observables sur de nombreux bâtiments, notamment autour des fenêtres. Celles-ci peuvent traduire un phénomène général de tassement des immeubles. La chapelle située rue Marceau, présente également un état de fissuration avancé.

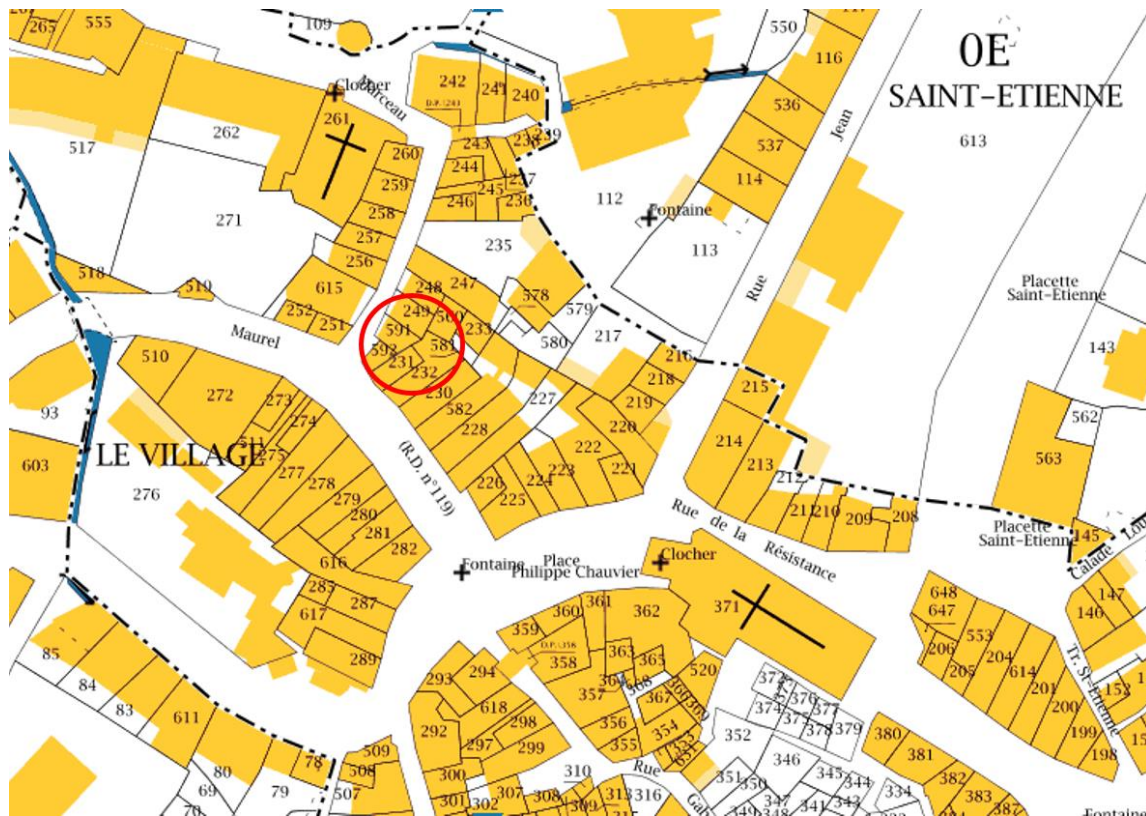


Illustration 11 : Localisation des désordres sur le plan cadastral (parcelles 231, 232, 249, 591 et 592 des rues Maurel et Marceau) d'après BRGM/RP-60536-FR.

¹¹ Rivet F., Mathon C. (2011) – Désordres sur des immeubles de la commune de Bargemon – Analyse du rapport d'expertise géotechnique du bureau d'études L.E.R.I.T. et recommandations, Rapport final. Rapport BRGM/RP-60536-FR. 77 p., 4 ill.



Illustration 12 : Désordres sur les habitations du centre-bourg (Source : rapport BRGM/RP-60536-FR par Rivet et Mathon, 2011).

Les investigations géotechniques et géophysiques menées par le bureau d'études LERIT en 2011¹² ont montré que les immeubles reposent sur des terrains déconsolidés et susceptibles de renfermer des vides souterrains (anomalies géophysiques) à faible profondeur (moins de 10 m). D'après le BRGM, ces analyses sont cohérentes avec la géologie du sous-sol, le centre de Bargemon reposant sur la formation hétérogène du Trias, composées de marnes, argiles, gypse, dolomies, cargneules, et sujettes aux phénomènes d'effondrements. Le gypse contenu dans cette formation est une roche très soluble, en particulier dans les eaux météoriques agressives, favorisant la formation de vides. Les circulations d'eau sont très développées dans le centre-ville. L'existence de vides souterrains sous les immeubles est très probable et le contexte hydrogéologique de subsurface du secteur est un facteur aggravant en matière de dissolution/érosion du gypse.

¹² LERIT Expertise (2011) – Rapport d'expertise géotechnique - Secteur angle des rues Marceau et Maurel, Commune de Bargemon (83830). 63 p. et LERIT Expertise (2011) – Note pour demande de mesures conservatoires - Secteur angle des rues Marceau et Maurel, Commune de Bargemon (83830). 63 p.

Le rapport LERIT décrit une zone géologique, constituée par des calcaires altérés à très altérés, avec des blocs rocheux, du sable argileux et de l'argile. Terrains du Secondaire, du Trias, soumis à une tectonique de broyage très intense depuis 70 millions d'années. Région conditionnée par 4 phases de plissements, en particulier la phase pyrénéo-provençale, il y a 35 Ma à l'Eocène, induisant des soulèvements en Provence. L'étage du Keuper est très développé, notamment à Bargemon. Dolomies blanches alternant avec des lits de marnes et des blocs de cargneules. Il existe dans cette formation, des intercalations de dolomies mal stratifiées qui ont été soumises, par l'action des eaux de ruissellements et d'infiltrations, à une dissolution intense et de plus, les argiles qui forment des matrices aux blocs rocheux peuvent contenir du gypse à l'état diffus. Le Keuper est un étage très hétérogène et chaotique d'une grande puissance entre 300 et 400 m. Il est composé de dolomies blanches à débit parallélépipédique, de marnes verte et lie de vin avec des cargneules et du gypse panaché. Le gypse est issu de la transformation de l'anhydrite, présente à la base du Trias, par hydratation. C'est une roche compacte mais tendre. Le gypse visible à l'affleurement, est lité et présente des alternances de couches fibreuses et niveaux saccharoïdaux. Sa structure en strates fines est moyennement déformée.

2.3. HISTORICITE DES ÉVÈNEMENTS D'EFFONDREMENT ET D'AFFAISSEMENT AINSI QUE DES ÉVÈNEMENTS DE GLISSEMENTS DE TERRAIN POTENTIELLEMENT LIÉS À LA DISSOLUTION DU GYPSE, SUR BARGEMON ET AUX ALENTOURS

Les effondrements sont la manifestation de l'instabilité la plus fréquente et la plus caractéristique du versant et de la Provence triasique, ils sont assez fréquents notamment entre Draguignan et Fayence, Néanmoins, la commune de Bargemon est l'endroit où la concentration est la plus dense et le versant de Bargemon ne constitue pas une exception. Les effondrements sont le fruit de la dissolution d'une roche sous-jacente, principalement issue de carbonates ou d'évaporites, La dissolution crée des cavités, il y a effondrement lorsque le toit de ces cavités se rompt. Ces ruptures sont toujours brutales, elles peuvent être favorisées par les conditions climatiques, un toit de roche tendre comme des marnes peut être fragilisé par la formation de fentes de dessiccation en saison sèche, C'est très probablement ce qui s'est produit le 22 août 1992 dans le quartier de Peyrui, ainsi que par le surpoids, souvent accentué par les installations humaines comme les habitations et autres constructions, installations de décharges, mise en place d'un couvert végétal mal adapté comme un bois, Sur le versant, les effondrements se repèrent par leur forme circulaire, Ils créent des dépressions à bords raides, nous les trouvons plutôt au nord du village, entre 436 m et 700 mètres environ d'altitude.

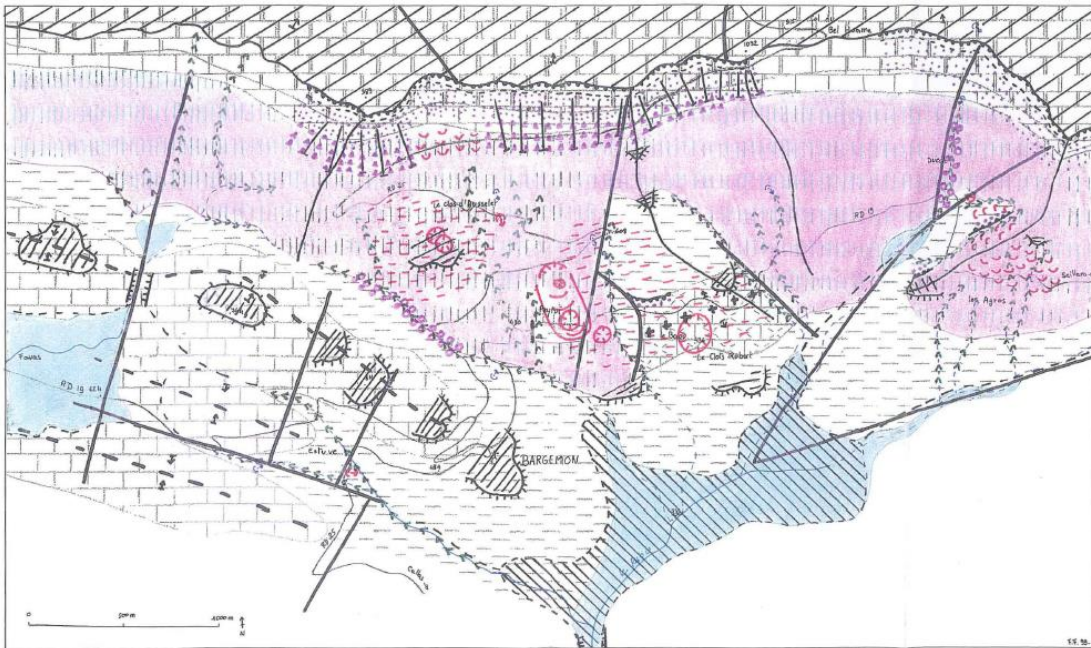
Ils se divisent en deux secteurs, **celui du Peyrui et celui du Clos d'Ausselet** (voir Illustration 13 : carte géomorphologique) :

Le secteur du Peyrui.

Ce secteur est vaste, il mesure environ 800 mètres d'est en ouest et 500 mètres du Nord au Sud. Il est compris entre 436 et 650 mètres d'altitude. Il comprend un assez grand nombre de structures circulaires, la plupart à peine visibles, sont la trace d'anciens effondrements ou tout simplement d'affaissements. Seuls quatre ou cinq se voient nettement: le Peyrui que nous avons déjà vu est le plus récent, il date d'il y a sept ans; le Baou, le plus grand du versant, 200 mètres de diamètre; celui des Adrech et un dernier entre celui du Peyrui et les anciennes carrières, en contrebas de la RD 19, ces deux derniers sont de taille plus réduite, de quelques dizaines de mètres de diamètre.

- *l'effondrement du Baou.* Le trou du Baou est l'effondrement le plus important du versant. Il se situe en contrebas de la RD 19 à environ 1,5 kilomètre du centre du village en direction de Seillans. Il daterait de la fin du 19^e siècle. Il mesure 250 à 300 mètres de diamètre à son bord,

le fond fait un peu plus de 100 mètres. Cet effondrement, comme tous ceux du versant, prend la forme d'une dépression à bords abrupts: le fond, humide, est à 436 mètres d'altitude, le bord le plus haut, au nord, est à environ 520 mètres. Les parois sont très raides et donnent une impression d'écrasement. Au sud, subsiste une espèce de levée de terre de plusieurs mètres de haut, limite inférieure de l'effondrement. Cet effondrement se trouve dans du Muschelkalk supérieur (t2c sur la carte géologique), il est composé de dolomie mais aussi de gypse. Or à Bargemon, le Muschelkalk correspond à un mont dérivé localisé au Clots Robert, séparé des autres structures par deux failles orientées nord/sud. Cet endroit, du fait de son appartenance à un anticlinal correspond à un bourrage de gypse. Ce bourrage est attesté par la coupe dans le gypse déjà abordée en première partie qui montre un pli chaotique caractéristique d'une remontée. Cet énorme effondrement semble s'être produit dans ce même gypse.



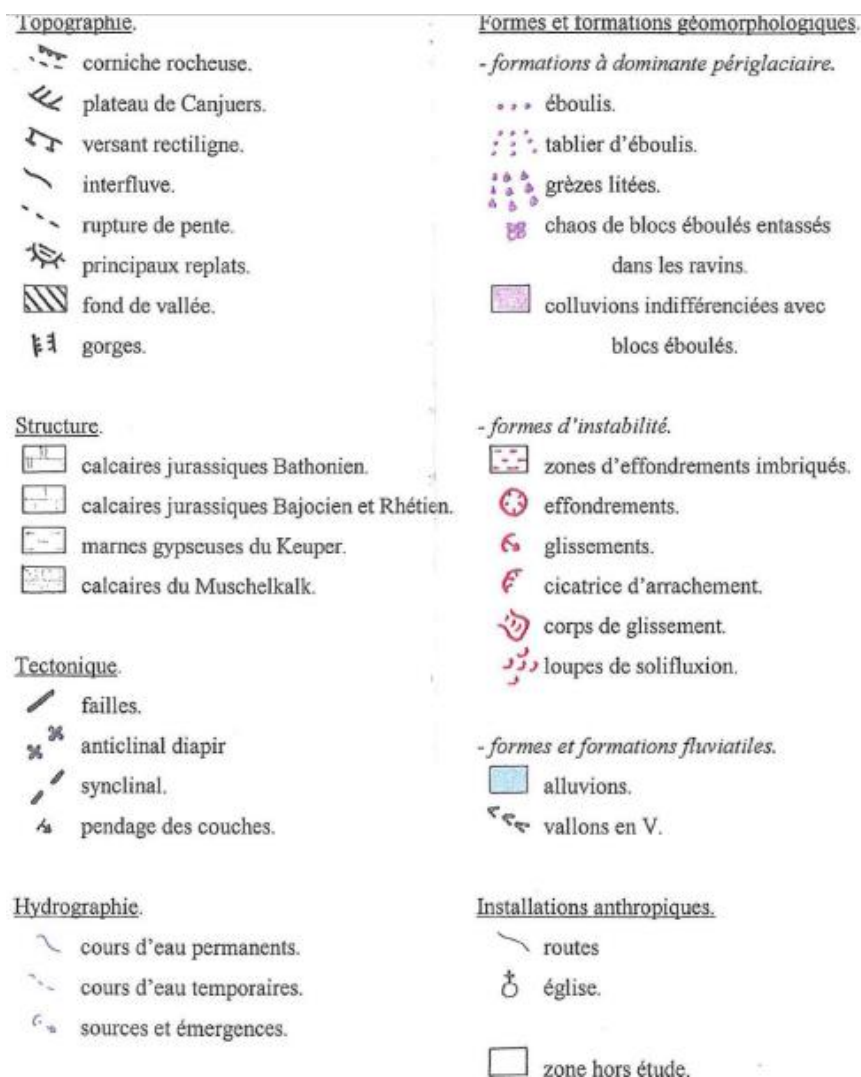


Illustration 13 : Carte géomorphologique du versant de Bargemon proposée par F. Fiolet (2000).

- *l'effondrement des Adrechs.* Cet effondrement daterait également de la fin du siècle dernier (P. Pothérat, M. Aelien de la Chapelle, R. Guinnet, C. Resson, 1996) 11 se situe juste en contrebas de la RD 25 à 560, 570 mètres d'altitude et à environ 200 mètres au nord de l'effondrement du Peyrui. Il est de taille réduite, sur la carte, il n'est pas visible: il ne forme pas une dépression circulaire comme celui du Raou mais une structure en arc de cercle d'une trentaine de mètres de diamètre, Avant 1965, une dépression en forme de doline de dix mètres de profondeur était encore visible, mais, de petite taille, elle a pu être comblée et aménagée en terrasse. Seule subsiste la paroi abrupte qui est maintenant boisée. L'effondrement s'est produit dans du Keuper recouvert d'une couche épaisse d'éboulis. A aucun endroit la roche en place n'affleure ;
- *l'effondrement entre le Peyrui et les carrières.* Il se situe en contrebas de la RD 19 à environ 60 mètres au sud-est de l'effondrement du Peyrui. Il semble faire une trentaine de mètres de diamètre pour un encaissement d'une vingtaine de mètres. Il forme une dépression circulaire dont le fond est à environ 470 mètres d'altitude. Il se localise, comme celui des Adrechs, dans les marnes du Keuper recouvertes d'une couche d'éboulis et à proximité d'une faille.

Le secteur du Clos d'Ausselet.

Ce secteur est moins étendu, il fait environ 600 mètres d'est en ouest pour 400 mètres Nord/Sud. Les formes sont également moins nettes que dans le secteur précédent. Seul un effondrement est observable, celui du Clos d'Ausselet. Les autres ne sont que de vagues traces circulaires à peine visibles. Elles correspondent soit à de très anciens effondrements comblés, soit à des affaissements qui indiqueraient des effondrements très profonds ou l'amorce de nouveaux effondrements.

- *l'effondrement du Clos d'Ausselet.* Cet effondrement daterait également de la fin du siècle dernier. Il se situe à 630 mètres d'altitude. Il ne possède pas une forme aussi distincte que celui du Raou, il s'agit aussi d'une dépression circulaire de très grande taille, le fond est également humide et semble faire une centaine de mètres de diamètre. En revanche, les parois ne sont pas abruptes. Comme les autres effondrements, en dehors du Baou et d'après la carte géologique, cet effondrement se situe dans du Keuper et est recouvert d'une épaisse couche d'éboulis. De la même façon que le Peyrui, cet effondrement pourrait être un karst polyphasé: il s'est effectué en plusieurs temps dans les différentes couches sous-jacentes du Muschelkalk et du Keuper, d'autant qu'en amont se sont déjà produits des effondrements qui ont modifié la pente du versant. Cet effondrement s'est encastré dans ceux préexistants sur la paroi nord et en la modifiant. C'est pourquoi nous n'avons pas cette impression d'écrasement que nous trouvons au Baou. Néanmoins, le rebord sud est toujours visible, il forme une levée de terre d'environ quelques mètres par rapport à la dépression.

Les glissements de l'Estuve et du jeu de boule : De taille réduite, ces deux glissements revêtent un caractère spécial puisqu'ils sont le fruit de la combinaison de deux manifestations de l'instabilité : ils marient à la fois un glissement de terrain et un affaissement lié au gypse.

- **le glissement de l'Estuve** (ou mur Peller) se situe sur la RD25 en direction de Callas à 750 m du centre du village et à 470 m d'altitude. Le 1er glissement a eu lieu le 13 février 1975 entraînant avec lui un mur de pierre sèches ainsi que la route. Comme les autres glissements il se localise dans des marnes du Keuper et à proximité d'écoulements d'eau : il se situe entre deux vallons très proches de quelques dizaines de mètres dont un à écoulement permanent. Des sondages ont montré la présence de gypse: pour le sondage dénommé SP 1 du 18 mai 1993 (CETE méditerranée 1993 pour la DDE), de 6,4 à 7 mètres de profondeur et de 13,3 à au moins 31 mètres (fin du sondage); pour le sr 1 du 28 mai 1993, à partir de 16,9 à au moins 50 mètres (fin du sondage). De plus, le puits à la base du mur Peller, recueillant les eaux de drainage, présente des eaux blanchâtres, fortement chargées en sulfates (380 mg/l) c'est-à-dire en gypse dissout. Mais la présence de gypse aggrave encore l'instabilité, cette fois sous la forme d'effondrements ou d'affaissements: la forte présence d'eau dissout le gypse et crée des cavités: le sondage SP 1 du 18 mai 1993 laisse supposer la présence d'une cavité entre 6,4 et 7 mètres de profondeur car ce niveau est constitué de marnes noires altérées et de gypse blanc et rose. La vitesse d'avancement de forage était très élevée, au moins 400 mètres par heure, ce qui peut laisser penser à la présence de cavités. De plus, l'eau fortement chargée en sulfates laisse supposer que celle-ci traverse des quantités importantes de gypse et le dissout au passage. Les analyses d'eau du 25 janvier 1983, effectuées par la DDAF au niveau du puits, ont indiqué des concentrations en sulfates de 380 mg/l. Avec un débit de 6,5 l/s, nous pouvons estimer à environ **84,5 tonnes de gypse dissous en un an soit un volume d'environ 52 m³**. Nous pouvons en déduire qu'en amont de ce glissement il existe des cavités dans la couche de gypse qui risquent de s'effondrer. Ceci prouverait qu'il y a une relation certaine entre les glissements et les affaissements, le dénominateur commun serait bien entendu le gypse. Contrairement aux autres glissements, il ne s'agit pas ici d'un simple mouvement terrain mais d'un mouvement complexe qui combine deux types de mouvements de terrain: les glissements et les effondrements. De plus, cette instabilité concerne une grande portion du versant, ce mouvement en profondeur touche probablement la structure puisque

nous trouvons du gypse sur une épaisseur d'au moins 50 mètres. Les aménagements effectués depuis ont stoppé le glissement entamé mais ne peuvent empêcher l'affaissement lié au gypse et au matériel en vrac ayant servi au comblement de 1975, affaissement qui se poursuit inlassablement. L'affaissement mesure environ dix mètres de diamètre et occupe les trois quarts de la route. Cependant, les affaissements ne se limitent pas à la route, ils peuvent également se produire en amont.

- **le glissement du jeu de boule** est un glissement très semblable au précédent. Il se trouve au droit de la décharge municipale, le long de la RD 19 vers Seillans non loin d'un vallon, toujours sur les marnes gypseuses du Keuper. Il forme un affaissement de forme semi-circulaire sur la route. Plus petit que le précédent, de quelques mètres de diamètre, il n'occupe que la moitié de la chaussée. Celui-ci n'a pas bénéficié d'aménagement particulier, seule est visible cette rupture semi-circulaire. Mais, suite à l'effondrement du Peyrui de 1992, non loin de là, des sondages ont été effectués dont un sur la RD 19 à moins de 250 mètres de ce glissement. Ce sondage a montré la présence de gypse à une vingtaine de mètres de profondeur. Ce glissement serait donc probablement semblable à celui de l'Estuve à savoir un mouvement complexe, une combinaison de glissement de terrain et d'affaissements et d'effondrements.

Analyse :

Ces quelques exemples, avec celui du Peyrui, sont révélateurs des endroits les plus sensibles aux effondrements. Mais, si nous nous en tenons uniquement à ces observations, l'impact de la dissolution du gypse tend à être limité à ces deux seuls secteurs alors que la majeure partie de la commune se trouve sur les mêmes Keuper et Muschelkalk à tendance gypseuse. L'exemple du glissement/affaissement de l'Estuve prouve qu'il ne faut pas se fier aux seules structures circulaires: la seule trace d'instabilité à cet endroit se repère sur la route avec la trace d'un glissement ; nous ne voyons nulle part de structures circulaires en amont. Pourtant, les eaux d'écoulement sont de couleur blanchâtre, fortement chargées en sulfates qu'elles ont acquies en traversant des masses de gypse en amont. De même, les sondages effectués sur le glissement ont montré une présence de gypse très importante et à des profondeurs variables. En dépit de l'absence de marque superficielle d'effondrement à cet endroit, le risque d'effondrement potentiel est très important notamment pour les espaces où s'accumule l'eau, c'est-à-dire au point de contact entre les calcaires du Jurassique et les marnes gypseuses du Keuper et à l'endroit même du glissement où le sondage SP1 du 18 mai 1993 indique des vitesses d'avancement de forage très élevées.

Certes, le glissement de l'Estuve est un exemple, mais il prouve que **les effondrements peuvent se produire pratiquement n'importe où à partir du moment où il existe du gypse pouvant être imprégné d'eau qui circule dans le versant**. Il montre aussi qu'en surface, à moins d'antécédents, il est impossible de déceler la présence de ces cavités qui, lorsque le toit s'effondre sous l'influence de la gravité et parfois avec l'aide de secousses telluriques, forment, ce que l'on appelle en région parisienne, des fontis (effondrements localisés).

Le point commun de tous ces effondrements s'explique par quatre facteurs (P. Pothérat, M. De la Chapelle, B. Guinnet, C. Besson, 1996) :

- la présence de niveaux de gypse dans le Keuper, toujours ces marnes gypseuses, et dans le Muschelkalk supérieur, le Lettenkohle, constitué de dolomie blanche à rosée stratifiée contenant localement du gypse dans les intercalations marneuses ;
- les structures anticlinales pincées d'axe de direction est-ouest ;
- la fracturation ;
- la forte présence d'eau.

La géométrie de l'aquifère karstique est subordonnée aux directions de fractures subméridiennes sollicitées en traction par la contrainte régionale : près de Figanières, dans le talus de la route, des fissures ouvertes de direction **N20° E**, tapissées de calcite, témoignent **du jeu de la contrainte actuelle et des phénomènes de dissolution/recristallisation associés**. Il était raisonnable de penser que **les vides à l'origine des effondrements récents seraient étroits et allongés selon cette direction**, ce qui a été confirmé par la campagne de forages et par la géophysique.

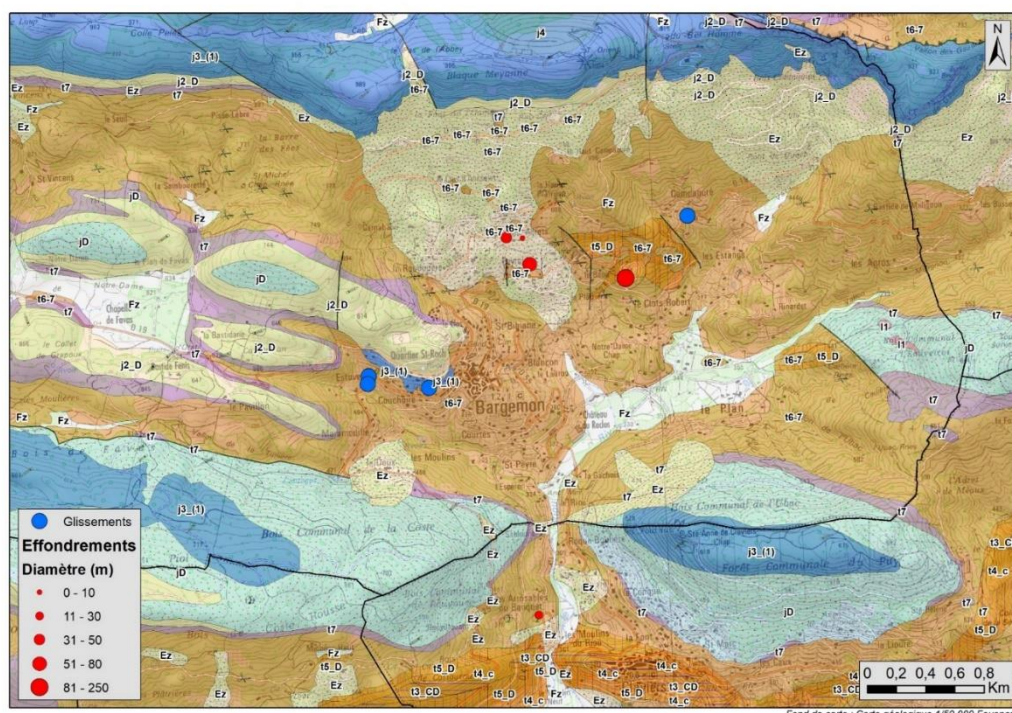
Outre les cinq anciens effondrements identifiés à Bargemon, de nombreux autres événements du même type ont pu être repérés près de Draguignan. Leurs diamètres varient de 20 m à 200 m (trou du Baou à Bargemon). De forme circulaire, ces effondrements présentent une bordure généralement raide, voire abrupte.

Dans ces mêmes secteurs, **des structures circulaires ou en arc de cercle** témoignent d'une instabilité du sous-sol en relation avec des processus de dissolution. Il s'agit soit d'anciens effondrements comblés, soit d'affaissements qui peuvent représenter des effondrements potentiels.

Les exemples décrits montrent qu'il existe une relation étroite entre les glissements et les effondrements. Cette relation s'exprime de deux façons soit par la dissolution du gypse comme au glissement/affaissement de l'Estuve où la formation de cavités en profondeur entraîne une rupture semi-circulaire sur la route qui par la suite part en glissement; soit à la suite d'un effondrement comme c'est le cas au Peyrui où l'effondrement a provoqué le déséquilibre du versant qui se réajustera avec le glissement qui est susceptible de se produire en amont si aucun aménagement n'est fait.

Les événements localisés sur Bargemon listés ci-dessous (Illustration 16) sont représentés dans les cartes des Illustrations 14 et 15 et le tableau et décrits en Annexe 1.

- effondrement du Baou (Clot Robert, fin XIX^e siècle) ;
- effondrement des Adrechs, fin XIX^e siècle ;
- effondrement du Peyrui 22 août 1992 ;
- l'effondrement du Clos d'Ausselet (fin du 19^e siècle) ;
- l'affaissement lié au glissement de l'Estuve ;
- l'affaissement lié au glissement « du jeu de boule » (1990) ;
- l'affaissement rue Marceau et rue Maurel (depuis les années 1970) ;
- le glissement du Duech (1980-2000).

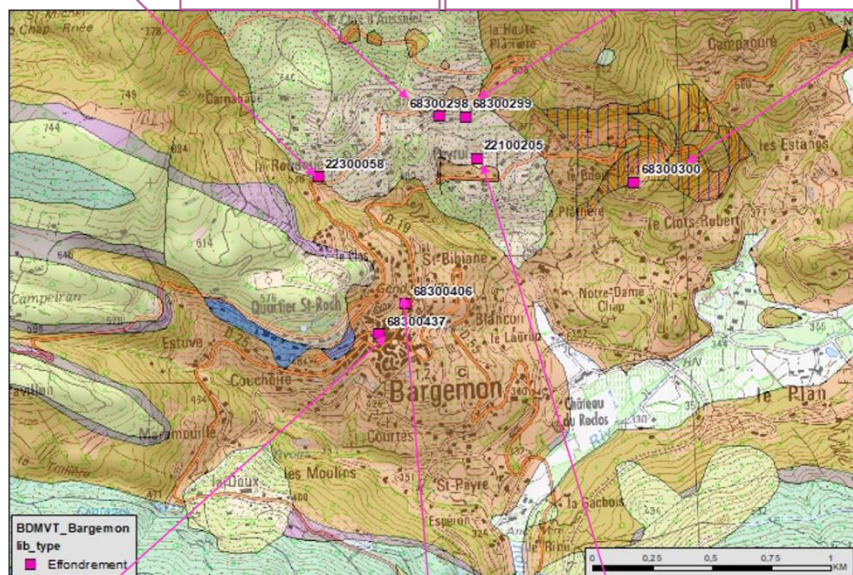


22300058 :
22/08/1992 – Diamètre du trou 70 m, profondeur 20 m – Dommages au réseau routier – 10 personnes évacuées – Précision XY : commune.

68300298 :
19^e siècle – Témoignage et étude LCPC 1996 – Effondrement aux **Adrets** (précision XY : 100 m) – Diamètre du trou 50 m

68300299 :
Date inconnue – Témoignage et étude LCPC 1996 + citation dans rapp, BRGM 35894 (1992) – 100 m3 effondrés aux **Adrets** (précision XY : 100 m) – Remblaiement par des pierres

68300300 :
19^e siècle – Témoignage et étude LCPC 1996 – Effondrement au **Baou** – Diamètre 250 m, profondeur 80 m



68300437 :
Date inconnue – Etudes en 2011 – **Rue Marceau et rue François Maurel** – Mouvements d'enfoncement et basculement des immeubles.

68300406 :
1992 – Effondrement aux **Adrets** dans un piémont d'éboulis – Précision XY : commune
Rq : point incohérent

22100205 :
22/08/1992 – LRPC / BRGM (rapp. BRGM 35984 de 1992) – Effondrement au **Peyru** entre RD19 et RD25 – Diamètre 80 m, profondeur 15 m, volume effondré 33 000 m3 – Bâti et route endommagés – 10 personnes évacuées

Illustration 14 : Localisation et description des principaux effondrements recensés sur la commune de Bargemon.

Comme le montre la carte de l'illustration 11 ci-dessous, il existe d'autres événements de moindre intensité sur la commune de Bargemon, ainsi que sur les communes alentours, cités dans la BD MVT.

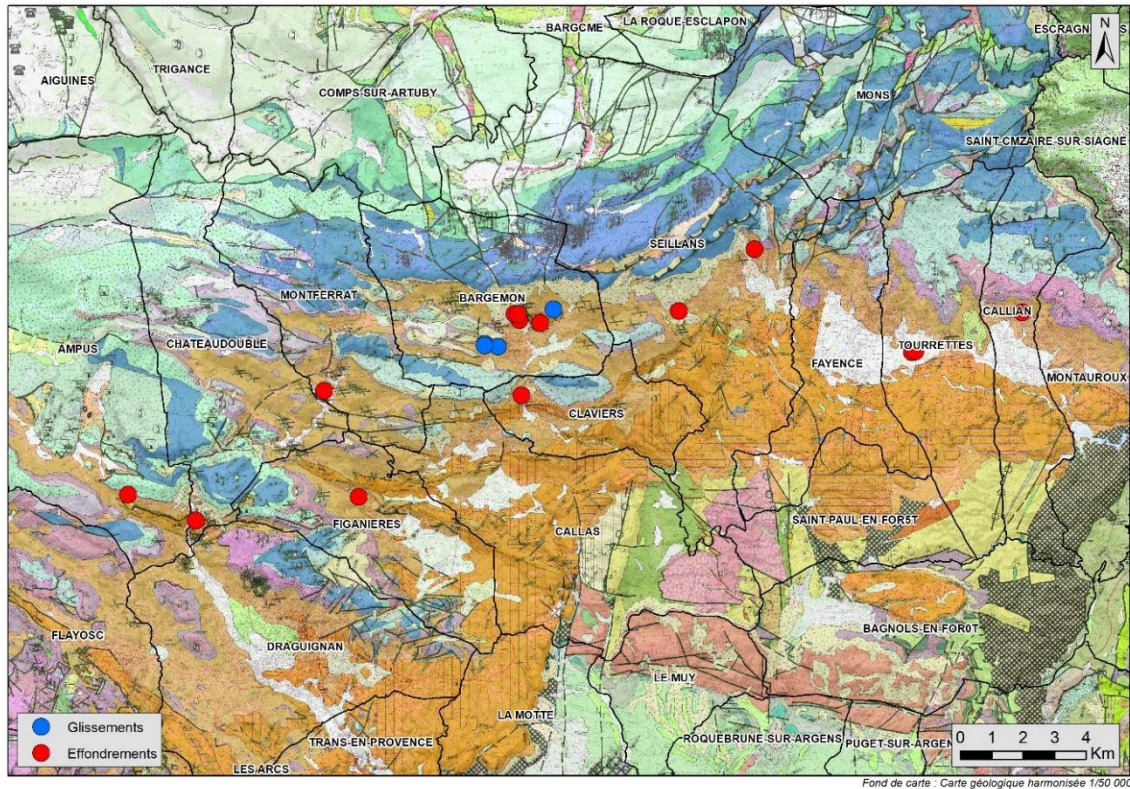


Illustration 15 : Inventaire des événements mouvements de terrain sur et aux alentours de la commune de Bargemon; fond géologique régional: carte harmonisée du Var.

Événements de moindre intensité sur la commune de Bargemon :

- glissement de terrain à Bibiane à Bargemon (1980) ;
- éboulement de Saint-Roch à Bargemon (date inconnue).

Événements sur les communes aux alentours de Bargemon :

- événement de Montferrat (date inconnue) ;
- affaissement à Figanières (1991) ;
- effondrement à Figanières le 15 juin 2010 ;
- effondrement à Chateaudouble (1978) ;
- effondrement à Ampus le 30 janvier 1996 ;
- effondrement à Claviers en 1987 ;
- effondrement à Seillans (date inconnue) ;
- effondrement à Seillans (décembre 2006) ;
- effondrement à Tourrettes (XVII^e siècle) ;
- effondrement à Tourrettes (décembre 1987) ;

- effondrement à Tourrettes (1951) ;
- effondrement à Callian (mai 1935) ;
- effondrement à Callian (24 mai 1952) ;
- effondrement à Callians (août 1965).

Le tableau ci-dessous et pages suivantes résume l'ensemble des effondrements et glissements de terrain observés et décrits dans ce chapitre.

BDMVT	Commune/Lieu	Date	Dimensions	Évolution	Carte géologique 1/50 000
22100205	Bargemon/Peyrui	22/08/1992	D 80 m P 15 m V 33000 m ³	Évacuation 10 personnes. Réactivation d'un ancien fontis. Jusqu'en 1995. Df 90 m Pf 30 m Vf 70000 m ³	Éboulis recouvrant le Keuper
68300299	Bargemon/ Les Adrechs	Années 1980	V 100 m ³	Cavité remblayée par des pierres	Éboulis recouvrant le Keuper
68300298	Bargemon/ Les Adrechs	Fin du 19 ^e siècle	D 30 à 50 m Pmin 10 m	Doline comblée après 1965	Keuper
-	Bargemon/ aval Peyrui	Inconnue	D 30 m P 20 m		Éboulis recouvrant le Keuper
-	Bargemon/ Clos d'Ausset	Fin du 19 ^e siècle	D 100 m		Éboulis recouvrant le Keuper
68300300	Bargemon/Le Baou	Fin du 19 ^e siècle	D 250 m P 100 m		Keuper et Muschelkalk supérieur dolomitique
68300396	Montferrat/Sainte-Anne	Inconnue	D 50 m P 10 m		Keuper
68300290	Figanières/RD54 et RD154	1991	D 3 m P 2 m	Affaissement lent et régulier. Remblaiement	Keuper

68300387	Chateaudouble/Re bouillon RD955	1978	D 50 m P 15m	Réactivation de fontis	Muschelkalk supérieur dolomitique
68300198	Ampus/ Les Adrechs	30/01/1996	D 10 m P 2 m	Arrêté de péril imminent	Keuper
68300046	Claviers/Les Arrosables du Banquet RD425	1987 et 15/12/2015	D 25 m P 5 m V 2000 m3	Remblaiement du 1 ^{er} fontis puis réactivation	Keuper
68300411	Seillans/Baguier	Inconnue	Taille d'un versant		Éboulis recouvrant le Keuper
68300412	Seillans/RD53 PR8+50	Décembre 2006	Affaissement chaussée suite à rupture de canalisation		Keuper
68300143	Tourrettes/Etang Chautard	17 ^e siècle	D 30 m		Alluvions recouvrant le Keuper
22300859	Tourrettes/Rivière Chautard	Décembre 1987	D 20 m P 50 m	Evacuation 20 personnes	Keuper
68300031	Callian/ Grande Rue Vieux Village	Mai 1935		1ers désordres	Alluvions recouvrant le Keuper
68300032	Callian/ Grande Rue Vieux Village	24/05/1952		Effondrement	Keuper
10000126	Callian/ Grande Rue Vieux Village	Août 1965	D 35 m P25 m	Evolution de l'effondrement. Cavité comblée en 1966	Alluvions recouvrant le Keuper
22100349	Bargemon/ Estuve Au-dessus de la D25	15/06/2010		Glissement occasionné lors de fortes précipitations. Aucun dommage sur biens ou personnes.	Keuper

68300294	Bargemon/ RD19 - PR19	01/01/1990	Affaissement de qq m de diamètre.	Affaissement-glissement. RD19 au droit de la décharge municipale.	Keuper
68300295	Bargemon/ Vallon de Bibiane RD25 PR18	01/01/1980		Réactivation ancien glissement à flanc de vallon RD25 PR18	Keuper
68300296	Bargemon/ Vallon de Peyregone RD25 PR19	01/01/1966	V 200 m3.	Affaissement-glissement. Réactivation récurrente, 23/02/1975. Dommages RD25 PR19.	Keuper

Illustration 16 : Inventaire des événements mouvements de terrain (table descriptive).

3. Programme de travail : mise en œuvre et résultats

3.1. DÉTECTION ET SURVEILLANCE DE LA DÉFORMATION DU SOL PAR L'INTERFEROMÉTRIE RADAR

3.1.1. Objectifs

L'objectif de démarrer le programme d'étude par une analyse interférométrie radar satellitaire était de pouvoir orienter l'analyse dès le début sur les zones éventuelles de tassement, en utilisant une carte de vitesse représentant la déformation du sol.

3.1.2. Méthodologie

Le SAR (Synthetic Aperture Radar) Interférométrique (InSAR) a déjà montré un potentiel très élevé pour la cartographie opérationnelle des déformations du sol depuis l'espace.

L'InSAR est une méthode qui permet de calculer une information sur la différence de phase de l'onde radar, mesurée sur deux scènes radar acquises sur la même zone à différents moments. La technique InSAR peut permettre de détecter et de mesurer les mouvements du sol avec une précision de l'ordre de la fraction de la longueur d'onde employée, la bande C dans ce cas-ci), inférieurs au centimètre dans notre cas. Les résultats sont visualisés sous forme d'interférogrammes, ou les changements de phase représentent des informations sur la déformation du sol. L'ensemble des interférogrammes produits peuvent être empilés et moyennés pour augmenter le signal sur bruit et ainsi obtenir une carte de vitesses.

En effet, la précision de la mesure InSAR est communément affectée par la décorrélation spatio-temporelle et le retard atmosphérique. Cet effet de décorrélation provenant de différentes sources peut être réduit en imposant de nouvelles méthodes de série chronologique InSAR à la pointe de la technologie en combinant des informations provenant de multiples acquisitions SAR au lieu que juste deux acquisitions. Par conséquent, l'interférométrie sur points persistants (PS-InSAR) et l'interférométrie Small-Baseline (SBAS-InSAR) sont proposés ici pour améliorer la précision de la mesure. Chacune de ces deux méthodes est basée sur le principe qu'à l'intérieur de la cellule de résolution il existe un rétrodiffuseur dominant (Persistent Scatterer, PS) dont les valeurs de phase SAR n'apparaissent pas aléatoires dans le temps. L'approche PS est basée sur l'utilisation d'une pile d'images SAR co-enregistrées. Plus grand est le nombre de données SAR utilisées, plus robustes seront les résultats. Ensuite, nous avons généré tous les interférogrammes différentiels, par rapport à une image maîtresse commune.

3.1.3. Réalisation et traitement

Dans cette étude, nous avons calculé une série temporelle de mesures par le radar à synthèse d'ouverture interférométrique des satellites Sentinel-1A et -1B afin d'étudier le taux et l'étendue de l'affaissement du sol dans la ville de Bargemon.

Les données SAR utilisées dans cette étude consistent en environ 100 images Sentinel 1 acquises sur des orbites ascendantes et descendantes, entre 2015 et 2019. Tous les interférogrammes ont été générés à l'aide de la dernière version du système de traitement InSAR Open Source (GNU General Public License), appelée « Outils génériques de cartographie, radar à synthèse d'ouverture (GMTSAR) ».

Pour corriger la contribution topographique à la phase interférométrique, nous avons utilisé le modèle numérique d'élévation (MNE) issu de la Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), 3-arcseconde.

Tous les interférogrammes ont été calculés sur la base d'un réseau de "single-master" pour l'analyse InSAR sur diffuseur (PS-InSAR).

Le choix des images maîtres est basé sur l'image qui minimise les lignes de base spatiales et temporelles entre deux images.

La piles d'interférogrammes a été traitées à l'aide du progiciel StaMPS. StaMPS permet l'identification de points PS en utilisant à la fois des informations d'amplitude du signal radar et de sa phase. Dans la première étape, la sélection initiale des points PS est effectuée sur la base de leurs caractéristiques spatiales du bruit, à l'aide d'une analyse d'amplitude. Le critère de dispersion d'amplitude est défini par $D_{\text{Amp}} = (\sigma_{\text{Amp}}/m_{\text{Amp}})$, où σ_{Amp} et m_{Amp} sont l'écart type et l'écart moyen de l'amplitude dans le temps, respectivement. Nous avons sélectionné une valeur seuil de 0,27 pour D_{Amp} , ce qui minimise la variabilité aléatoire de l'amplitude et élimine les pixels très décorrélés dans certaines zones couvertes de végétation et de champs agricoles. Une fois que les points PS cohérents ont été sélectionnés sur la base d'une analyse d'amplitude, la probabilité PS est affinée par une analyse de la phase entre points voisins, dans une série d'itérations. Ce processus permet la détection de pixels dont le signal de phase interférométrique est stable, même avec une faible amplitude. Une fois que la sélection finale de PS a été effectuée, la composant topographique résiduel peut être supprimé. Ensuite, le déroulement 3D de la phase PS est effectué à la fois spatialement et temporellement.

Les résultats : cette analyse permet de récupérer les cartes de taux de déplacement du sol moyennes en ligne de visée (LOS) (Illustration 17).

À ce stade du traitement fait en 2020, et avant de disposer de nouvelles données, il n'était alors pas possible de distinguer des déplacements horizontaux et verticaux.

Ce traitement spécifiquement fait pour le présent rapport permet de noter déjà que les déformées (en éloignement) sont maximales dans le fond du vallon Riou et sur les pieds de versants alentours, ce qui a permis d'orienter quelques reconnaissances spécifiques notamment géophysiques autour de cette zone.

Depuis 2020, au moment de l'interprétation des données et de la réalisation de la carte de sensibilité, de nouvelles données traitées issues de l'interférométrie radar ont été mises à disposition gratuitement. Elles nous ont permis d'aller plus loin dans l'interprétation (voir paragraphes suivants). Ces analyses tiennent également compte des avancées géologiques et hydrogéologiques présentées plus tard

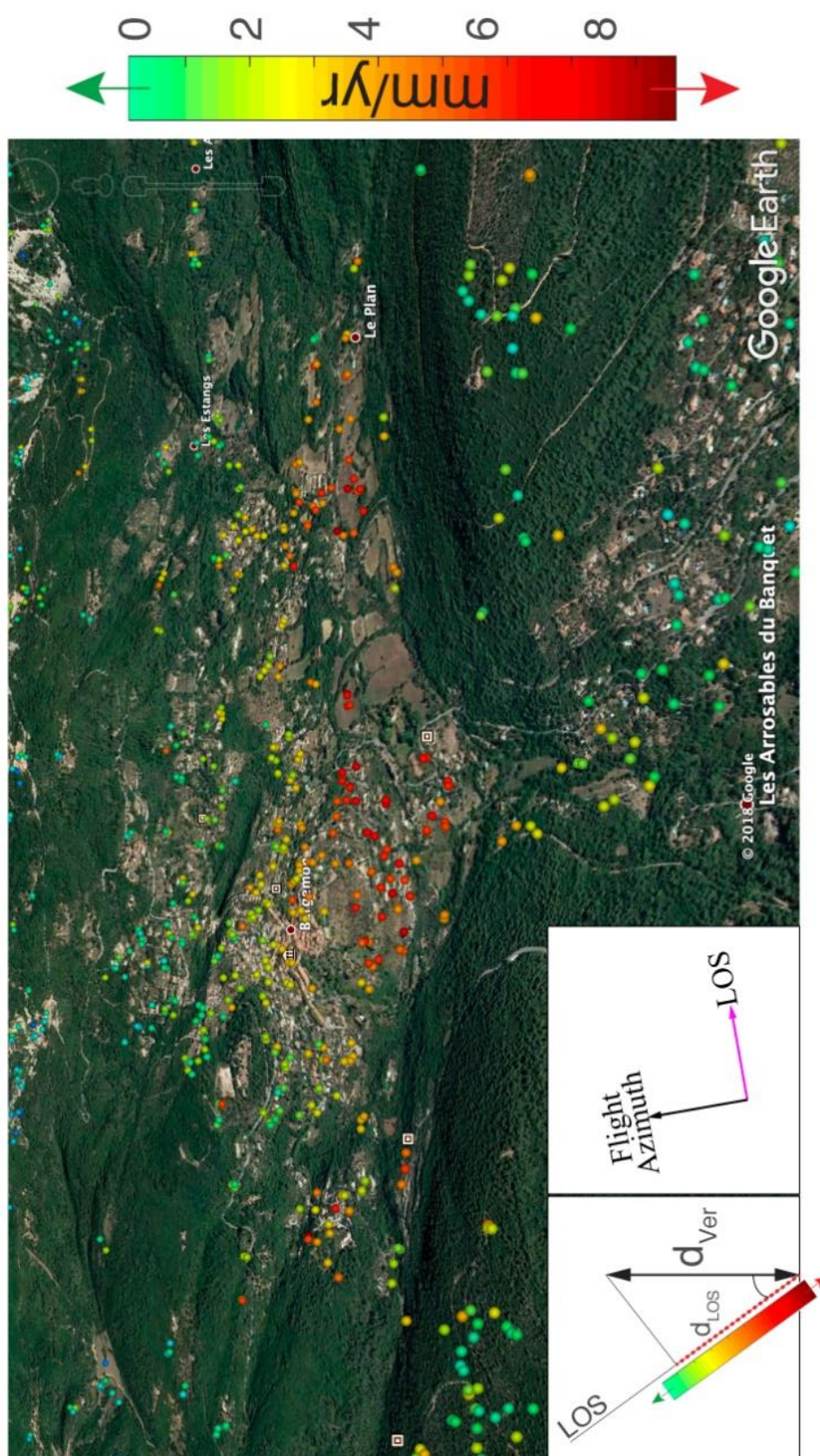


Illustration 17 : Les vitesses positives (couleurs froides) représentent les zones stables et le déplacement du sol vers le satellite, tandis que les vitesses négatives (couleurs chaudes) indiquent un éloignement du satellite.

Dans le cadre de développements méthodologiques financés par l'Europe (programme Copernicus) et déployés avec l'aide de l'agence européenne de l'environnement, il est désormais possible depuis juin 2022 via la plateforme European Ground Motion Service (EGMS) et ceci gracieusement, de disposer de résultats décomposées en déformées verticales altimétriques et pour partie en déformées horizontales suivant sa composante planimétrique est-ouest¹³ (ceci en bénéficiant d'un an de chroniques de données supplémentaires).

De plus, les résultats sont disponibles sur l'ensemble de l'Europe et avec une capacité de résolution qui reste compatible avec l'échelle de travail voulue à la commune. Il y a donc moyen de comparer les résultats obtenus à celles de communes voisines au même contexte géologique ou d'autres situées dans des contextes géologiques différents (notamment sans problématiques d'effondrement/affaissement ou d'autres types de mouvement de terrains comme les glissements de versants).

L'interprétation des résultats de déformées est ainsi largement facilitée, notamment vis-à-vis des pentes en surface plus ou moins impactantes par leurs effets gravitaires (qui peuvent contribuer sinon à bruite la lignée de visées).

Ces nouvelles cartes résultantes des suivis interférométriques montrent plusieurs enseignements clés nouveaux, énoncés ci-dessous avant de détailler et d'illustrer cela plus en abondance dans la suite du paragraphe :

- l'essentiel des déformées de la ligne de visées là où le signal était le plus intense (au sud-est de la commune) est bien due à la déformée verticale, avec le même ordre de grandeur d'intensité (**1 à 8 mm/an**) et sa hiérarchisation spatiale (plus lisse et moins bruitée) et pour des valeurs exclusivement négatives, donc indicatrice de mouvement en tassement affaissement (au moins pour la zone plate du Fond Riou) ;
- le reste de la déformée de la ligne de visées là où le signal était le plus intense au sud-est de la commune, pour sa partie accessible (composante Est-Ouest) indique une faible déformée de la butte du village vers l'est (donc dans une logique gravitaire selon la pente) autour d'un mm/an en gros ;
- cette déformée essentiellement verticale ne s'observe pas à cette intensité maximale, ni sur les communes voisines au contexte géologique +/- proche ni sur des communes plus éloignées hors contexte de gypse. Des déformées de plus de **20/25 mm/an voire jusqu'à 50 mm/an** en 4,5 ans de suivi ne s'observent ailleurs que sur des zones de glissement actifs, de subsidence connue. Il s'agit donc bien là **d'une zone anormale** qui témoigne sans équivoque d'un large **périmètre de surface en cours d'affaissement**.

a) Déformées verticales

Sur Bargemon, un secteur de la commune apparaît nettement visible par la densité des points de suivi, le gradient régulier d'intensité croissante depuis le centre bourg, la butte du village jusqu'au fond Riou avec des intensités moyennes de subsidence de 1,5 à 1,8 mm/an jusqu'à 4 à 6 mm/an dans le fond du vallon Riou et même un peu plus de **8 mm/an** un peu plus en amont vers l'est (Illustration 18).

¹³ Il manque donc la moitié de la déformée horizontale, celle de l'axe Nord-Sud.

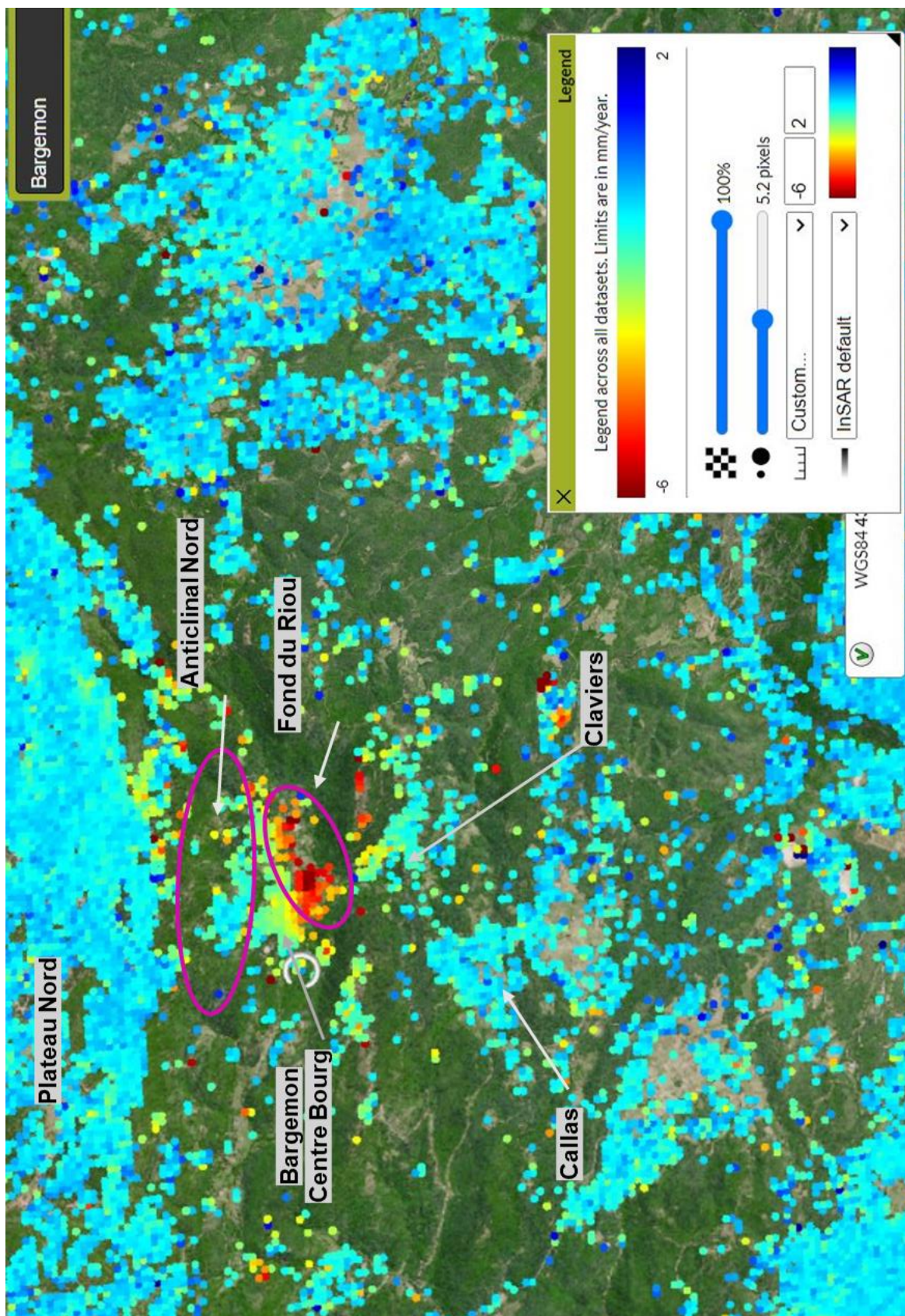


Illustration 18 : Déformées verticales moyennes mesurées en mm/an entre 2016 et 2020 (source EGMS) sur Bargemon et alentours.

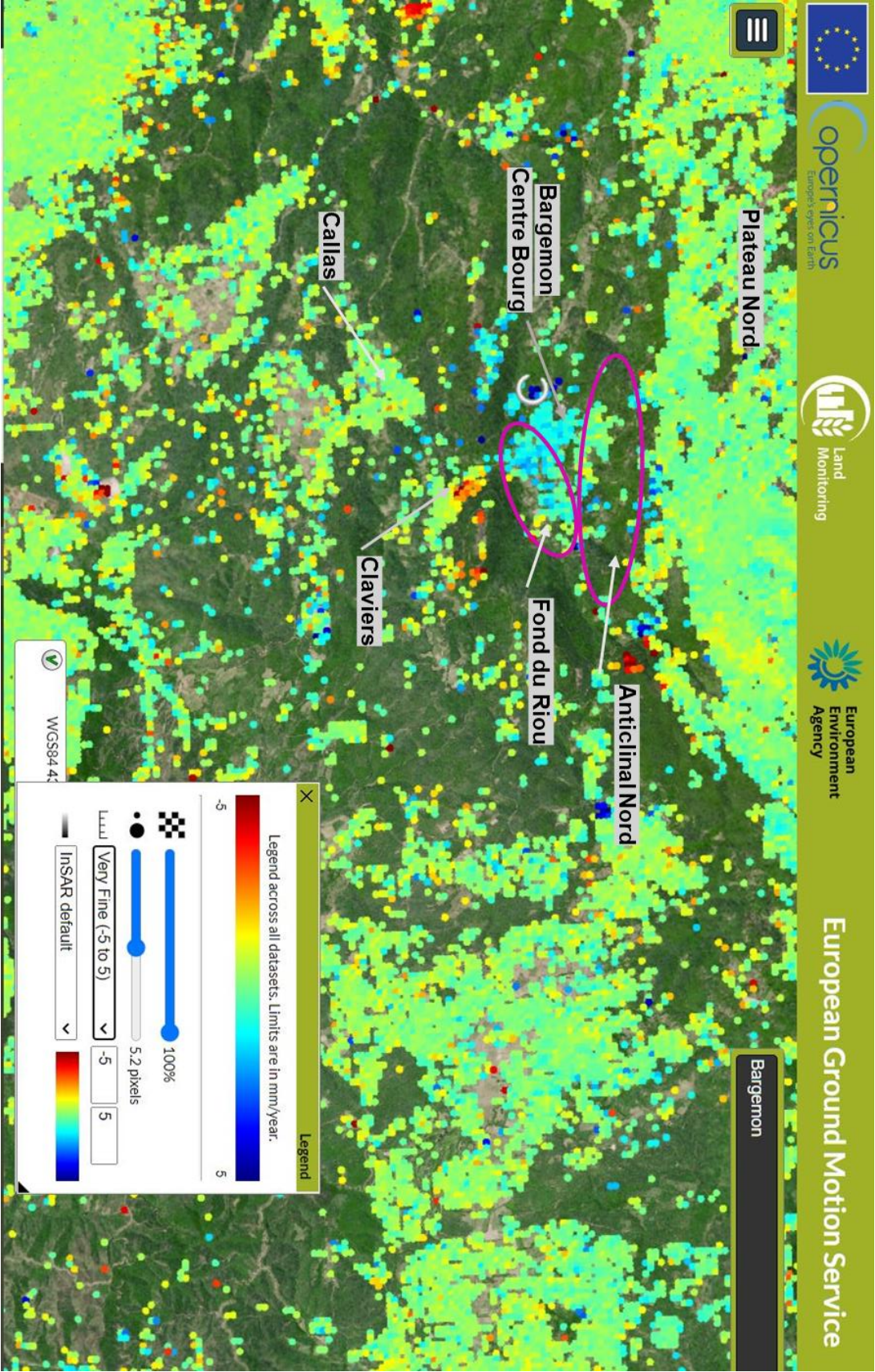


Illustration 19 : Déformées horizontales moyennes mesurées en mm/an entre 2016 et 2020
(source EGMS) sur Bargemon et alentours.

Là où les intensités sont maximales, il s'agit du fond plat du vallon Riou, qui est par ailleurs la zone la plus basse de la commune. Sur sa zone sans pente et sans indices de décrochements, il s'agit donc d'une zone subsidente en affaissement. Ce secteur particulier sera présenté plus en détails (cf. § « 'Anomalie du fonds Riou »).

En dehors de cette zone, les points de suivi sont plus épars en nombre et vite très hétérogènes dans les mesures de déformées, avec souvent des mesures contradictoires d'un point à son voisin, y compris dans les secteurs de grandes désordres historiques (secteur anticlinal nord par exemple) où aucun signe récent (depuis 2015) de poursuite en affaissement ou effondrement n'est ainsi repéré.

On note aussi que sur les communes voisines à géologie similaire (substratum du Trias à l'affleurement dont les couches de gypse), aucun phénomène subsident d'ampleur n'est présent, avec à peine des points qui submergent individuellement du bruit de fond.

b) Déformées horizontales (composante est-ouest)

L'examen des déformées horizontales (Illustration 19) montre aussi un léger déplacement assez systématique vers l'est dans la zone en subsidence qui affecte notamment la butte sur lequel le bourg du village de Bargemon s'appuie (de pente générale sud-est). Ce déplacement moyen est généralement proche d'1 mm/ an, mais avec des variations spatiales plus hétérogènes de 0,1 mm/an jusqu'à 1,8 mm/an pour les points les plus concernés.

En dehors de cette zone, l'essentiel des points de suivis sont sans déformée notable (en vert) ou ne concernent que des surfaces limitées (possibles petits glissements locaux notamment suivant les pentes, plus particulièrement identifiés ici si la pente naturelle est orientée vers l'est ou vers l'ouest).

c) Anomalie du fond Riou

Lorsque les vitesses de déformées verticales restent limitées (1 à 2 mm/an), ces valeurs dépassent guère le bruit de fond et elles ne correspondent pas forcément à un mouvement de terrain avéré (simple effet de l'érosion *a priori*). Lorsque ces valeurs dépassent d'un facteur de 2 à 2,5 ces valeurs (2 à 5 mm/an), il ne fait plus de doute qu'on a affaire à un mouvement de terrain spécifique et actif.

Lorsqu'on regarde la zone ainsi concernée (mouvement de 4,5 mm/an¹⁴ et plus), cette zone (Illustration 20) en anomalie concerne avant tout le fond de la plaine du Riou, secteur par ailleurs le plus bas de la commune, mais elle déborde aussi sur le pied de la butte du village de Bargemon.

¹⁴ Pour un maximum dans le village de 1,8 mm/an



Illustration 20 : Zone anormale avec déformées verticales moyennes supérieures à 4,5 mm/an.

S'agissant d'un espace majoritairement plat, l'origine d'un affaissement d'une telle amplitude entre 25 et 45 cm depuis 2016¹⁵ ne peut s'expliquer dans le contexte géologique que par une dissolution de gypse sous-jacent soutenue et active depuis 2015 dans ce périmètre. Dans le contexte de point bas, il pourrait s'agir davantage des horizons du Muschelkalk, plus sans doute que ceux du Keuper largement affleurant sur une bonne partie de la commune. D'un point de vue hydrogéologique, la zone correspond aussi au point de convergence principal du drainage topographique des différents aquifères et du réseau hydrographique +/- en connexion, ce qui n'est clairement pas fortuit.

d) Chroniques interférométriques et quelques premières observations préliminaires annexes

Au-delà des estimations de vitesses moyennes des déformées, il est possible de regarder les chroniques sur chacun des points de suivi (Illustration 21).

¹⁵ Cette ampleur n'est que la partie mesurée par inclinométrie (directement lu sur les chroniques des points de suivi inclinométrique) auquel s'ajoute la valeur indéterminée en début de l'affaissement en cours datant sans doute de 2014 (sans compter d'autres épisodes possibles passées de réactivation dans les décennies antérieures et un possible mouvement en continu de bruit de fond entre deux phases de réactivation plus marquées)

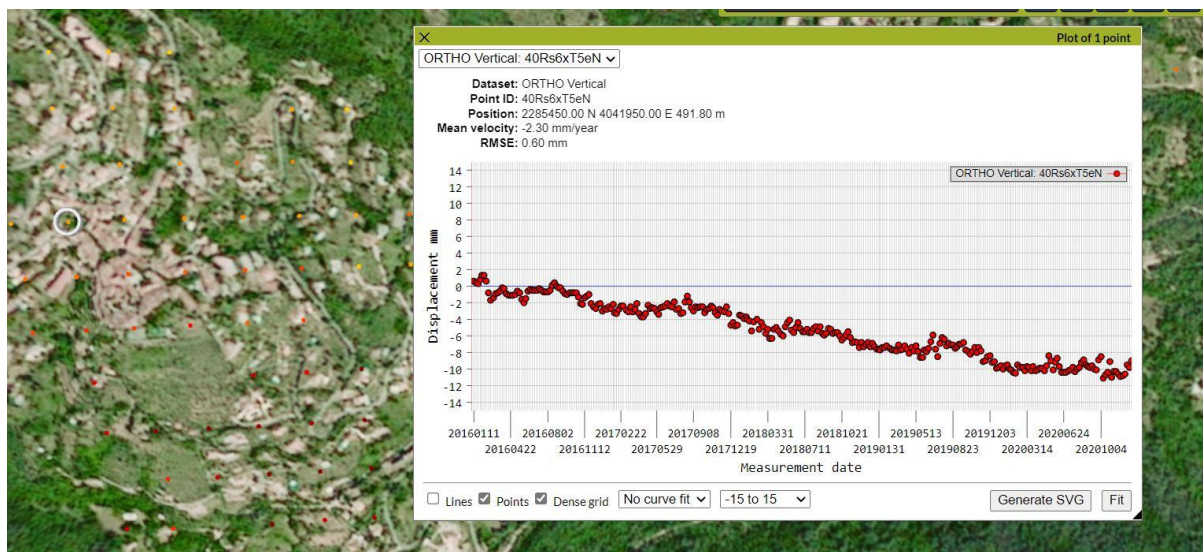


Illustration 21 : Chronique interférométrique (déformée verticale) sur un point de suivi au cœur du bourg (cercle blanc) i.

Sur ces chroniques, on observe la plupart de temps une composante cyclique saisonnière (mais pas toujours parfois un simple comportement de fond plus ou moins bruitée) lié à des effets thermiques (Illustration 22) surtout (tendance à la baisse en hiver et à la hausse en été), mais sans doute aussi parfois des fluctuations saisonnières liées au retrait (estival) et gonflement (hivernal) des argiles. Sinon, la tendance de fond marquée en début de suivi (2016) montre un ralentissement important depuis (Illustration 23).

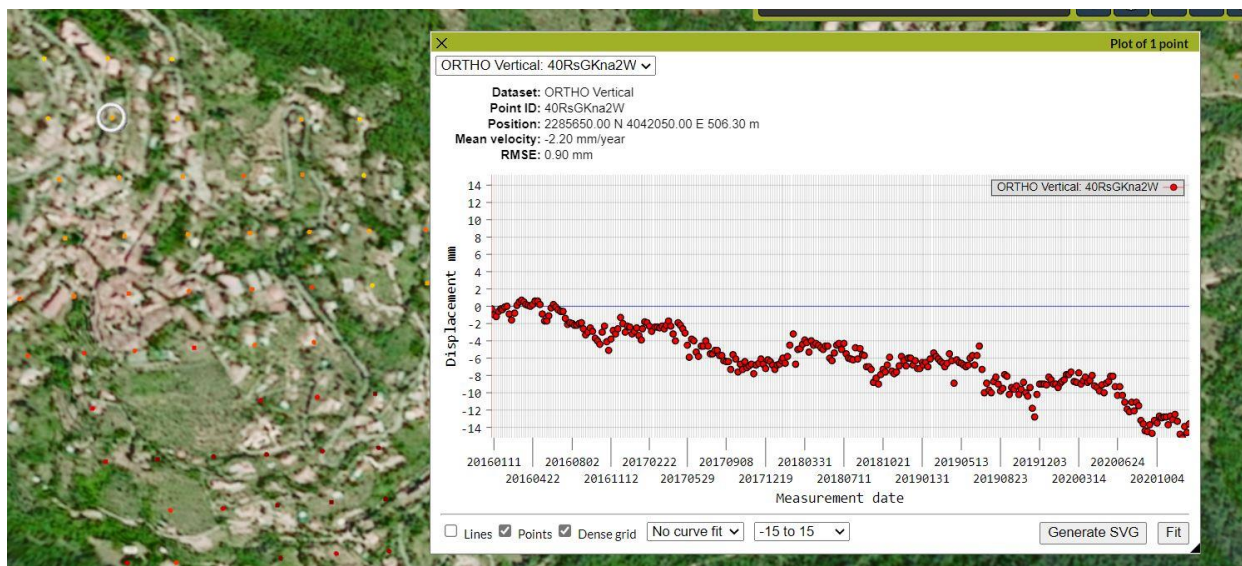


Illustration 22 : Fluctuations saisonnières plus prononcées liés aux effets thermiques.

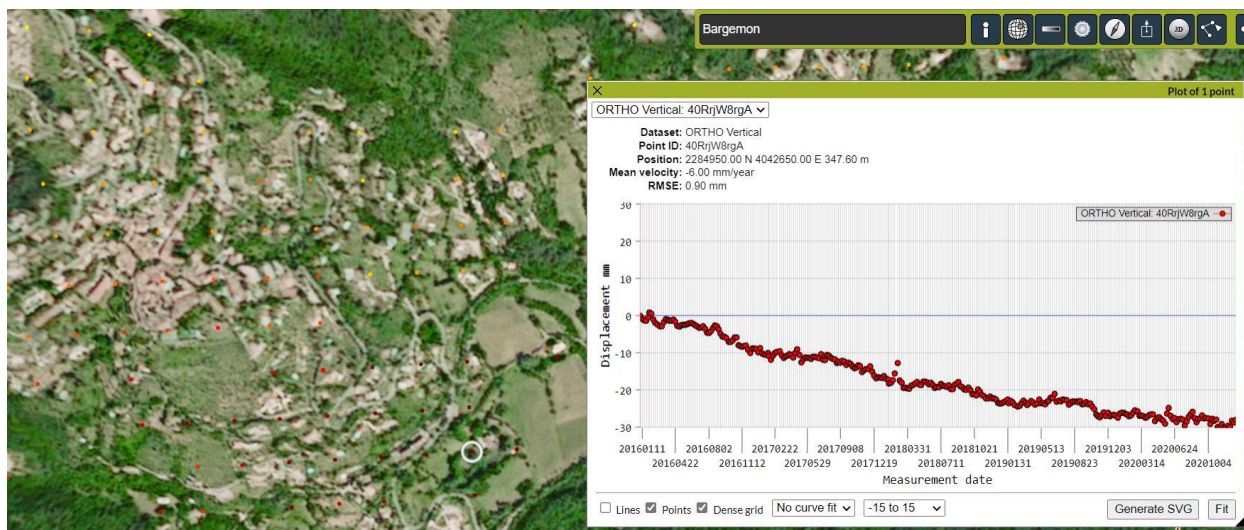


Illustration 23 : Tendance au ralentissement de l'affaissement depuis le début de suivi en 2016.

Cette tendance est probablement à mettre en lien avec le contexte climatique, très excédentaires en 2014 et plutôt déficitaires ensuite. Une saturation importante des versants a probablement eu lieu courant 2014 réactivant sensiblement avec effet différé la dissolution du gypse dans ce secteur et faute d'une réalimentation significative depuis cette date, le processus s'est ralenti et pourrait même finir par se stopper, et avec effet retard aboutir à un arrêt au moins provisoire de l'affaissement constaté et sans doute toujours en cours bien que de plus en plus résiduel.

Les chroniques proposées concernent la composante verticale tel que décrite ci-dessus mais aussi la composante est-ouest (Illustration 24) qui montre là aussi qu'il s'agit d'une déformation en continu en cours de ralentissement.

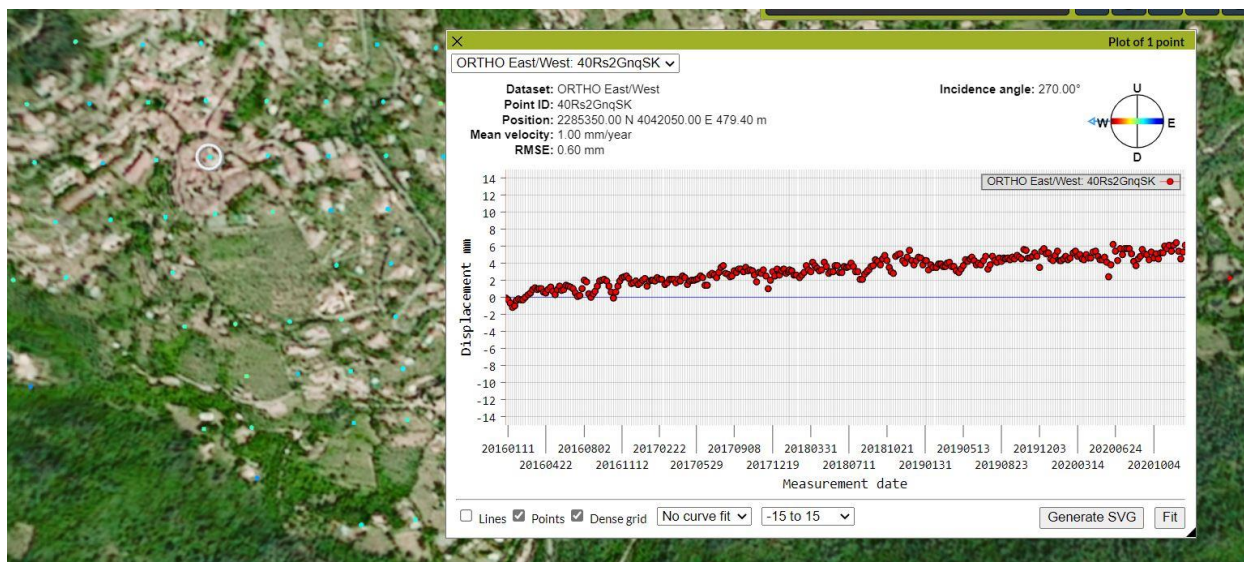


Illustration 24 : Chronique interférométrique (déformée horizontale ouest-est) sur un point de suivi au cœur du bourg (cercle blanc).

En regardant les deux courbes ensemble (Illustration 25), on peut observer que les fluctuations saisonnières sont bien synchrones, indicateur des effets thermiques (et donc attribuables que marginalement aux effets du RGA)

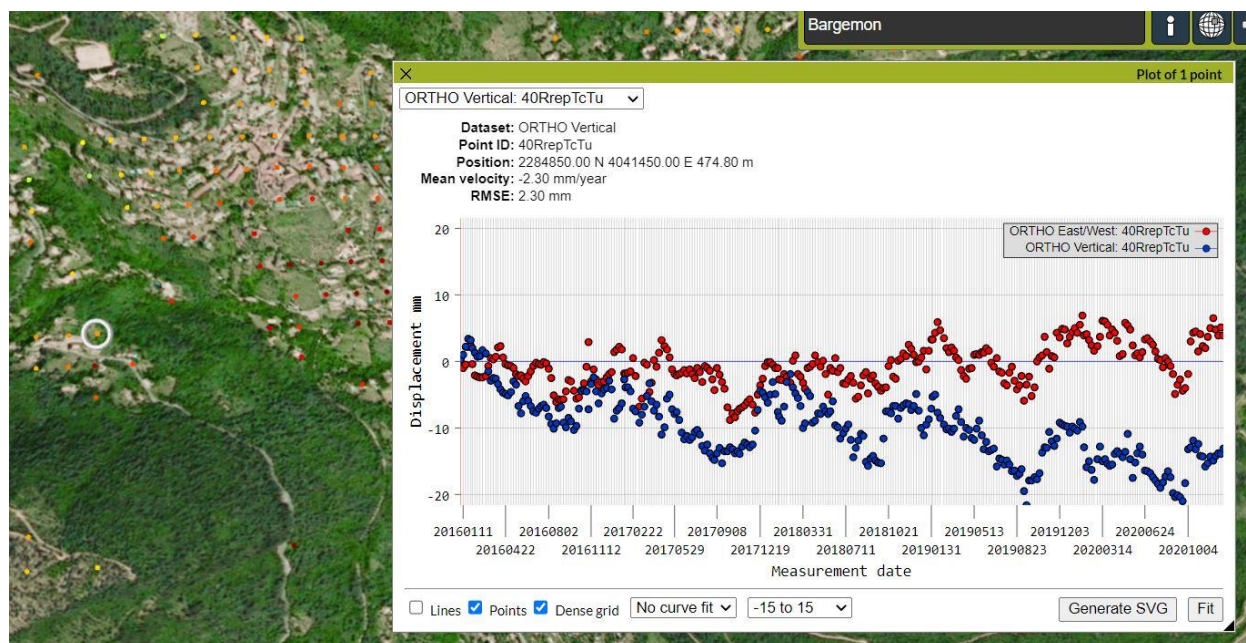


Illustration 25 : Fluctuations synchrones des déformées verticales et horizontales (composante est-ouest).

3.2. SYNTHÈSE GÉOLOGIQUE LOCALE ET RÉGIONALE ET RÉINTERPRÉTATION STRUCTURALE

Les désordres affectant la commune de Bargemon (cf. chapitre 2.2 et Annexe 1) sont tous localisés dans les séries sédimentaires déformées du Trias à faciès du Keuper, riches en gypse et en argile. L'étude géologique vise donc à préciser la géologie du Keuper : (1) identification et répartition des faciès sédimentaires (en particulier des occurrences de gypse, et (2) déformation de roches (plis et fracturation). Après une brève introduction au cadre géologique local et régional, ce chapitre présente ainsi les travaux menés pendant et à la suite des deux campagnes sur le terrain (observations géologiques, interprétations, conclusions). Ces investigations apportent des précisions importantes sur la géologie du secteur étudié, qui sont confrontées dans la suite du chapitre aux études hydrogéologiques et géophysiques, puis prises en compte lors de l'analyse de risque à l'échelle de la commune de Bargemon.

3.2.1. Cadre géologique

Les interventions de terrain ont fait suite à un premier travail de compilation de données, dont voici la liste (peu nombreuses sur le secteur même de Bargemon) :

- cartes géologiques à 1/50 000, en particulier la feuille de Fayence (n°998) sur laquelle se trouve la commune de Bargemon ;
- photographies aériennes anciennes, avec un examen particulier, depuis le site « remonter le temps » de l'IGN (www.geoportail.fr), des campagnes 1944, 1950, 1958, 1966, 1971 et 1972. On signalera la difficulté d'exploiter les images anciennes du fait de la taille des objets ciblés et de la présence de nombreux murets en pierre sèche retenant la terre (restanques) qui perturbent l'interprétation géomorphologique des images ;
- Google Earth © pour pointer les zones d'affleurement potentiel ;

- données de sondage recensées en BSS avec analyse des forages disposant d'une description géologique ;
- Rapports BRGM et de bureaux d'études mis à disposition du projet et contenant des informations de sondages ;
- Publications scientifiques citées dans le texte, en particulier (a) Fiolet (2000) qui apporte des informations complémentaires sur les aspects géomorphologiques en lien avec les instabilités de versant, et (b) Pothérat (1997) qui apporte des informations structurales en relations avec les effondrements liés à la dissolution du gypse.

Le document principal permettant de percevoir la géologie du secteur est la carte géologique au 1/50 000 (Feuille 998 - Fayence ; Mennessier *et al.*, 1966 ; complétée par Pothérat (1997) et Fiolet (2000)). Cette carte a été intégrée à la carte harmonisée du Var, qui sera utilisée dans la suite comme fond géologique des figures successives (Illustration 27). L'analyse de la carte géologique montre que le Keuper (t3 dans la notice et sur la carte géologique), le Muschelkalk sous-jacent (t2a, t2b et t2c) et le Jurassique sus-jacent (I1 et J), forment dans les environs de Bargemon le cœur d'une vaste structure antiforme orientée selon une direction N110 (anticlinal de Sambourette-Peyrui, Illustration 27). Plus spécifiquement les unités jurassiques décrivent des structures plissées de longueur d'onde kilométrique (synclinaux perchés du Bois de la Coste, du Château de Favas, de Campeiran, de Bargemon Illustration 27). Ces déformations ont aussi affecté le Trias (Keuper et Muschelkalk), mais la carte géologique ne rentre pas dans le détail de sa structure interne. En effet ces synclinaux ouverts sont séparés par des anticlinaux étroits (Illustration 27), certainement contrôlés par des décollements tectoniques dans le Keuper. Aucune donnée ponctuelle ne permet à partir de la carte géologique de contraindre la géométrie interne de cette unité dans le secteur de Bargemon. Cette représentation cartographique ne reste en effet valable qu'à cette échelle et devient plus complexe dans le détail, comme décrit par la suite. Plus généralement en Provence l'unité argilo-évaporitique du Keuper est le niveau de décollement principal pour la tectonique chevauchante alpine, montrant systématiquement une structure complexe, plissée et faillée. L'effondrement de Peyrui, emblématique de la commune, est par exemple enchâssé dans ce vaste polygone de Keuper à proximité des dolomies du Muschelkalk, plus ou moins masqué par une couverture d'éboulis et de brèches de pente récents.

La description du Keuper de la notice de la carte géologique de Fayence ne laisse que peu de doute sur la complexité géologique du secteur : *« cet étage forme une masse puissante et chaotique, où toute stratigraphie détaillée est très délicate, voire impossible. Néanmoins, de haut en bas, on peut reconstituer la série suivante: dolomies blanches à débit parallélipédique alternant avec des marnes vert réséda; marnes irisées vert pastel et lie de vin, avec des cargneules géométriques plus ou moins massives; gypses panachés; dolomies stratifiées en un banc d'une dizaine de mètres; argiles plastiques grises; argiles noires avec gypse panaché et marnes verdâtres; dolomies cargneulisées en bancs stratifiés et épaisses de plusieurs mètres; marnes dolomitiques jaunâtres, cargneules, gypse et marnes jaunâtres »*. Le gypse est décrit à trois reprises, le niveau le plus significatif étant le gypse panaché, seul niveau individualisé dans la série. L'Illustration 26 représente une tentative de représenter la colonne stratigraphique du Keuper, en l'absence de toute indication d'épaisseur des unités lithostratigraphiques.

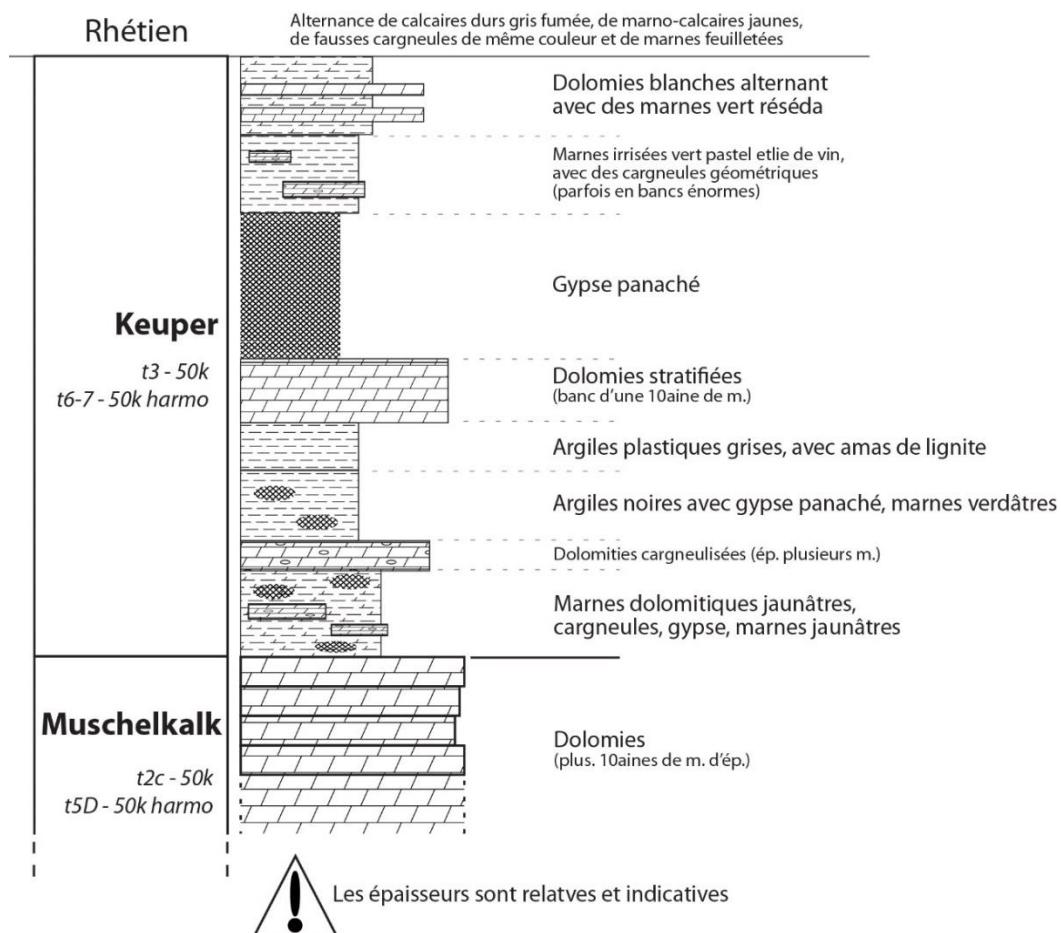


Illustration 26 : Succession stratigraphique du Keuper d'après la notice de la feuille de Fayence (n°998)¹⁶.

¹⁶ Mennessier G. et al (1966) - Carte géologique et notice de la feuille de Fayence, n°998, BRGM

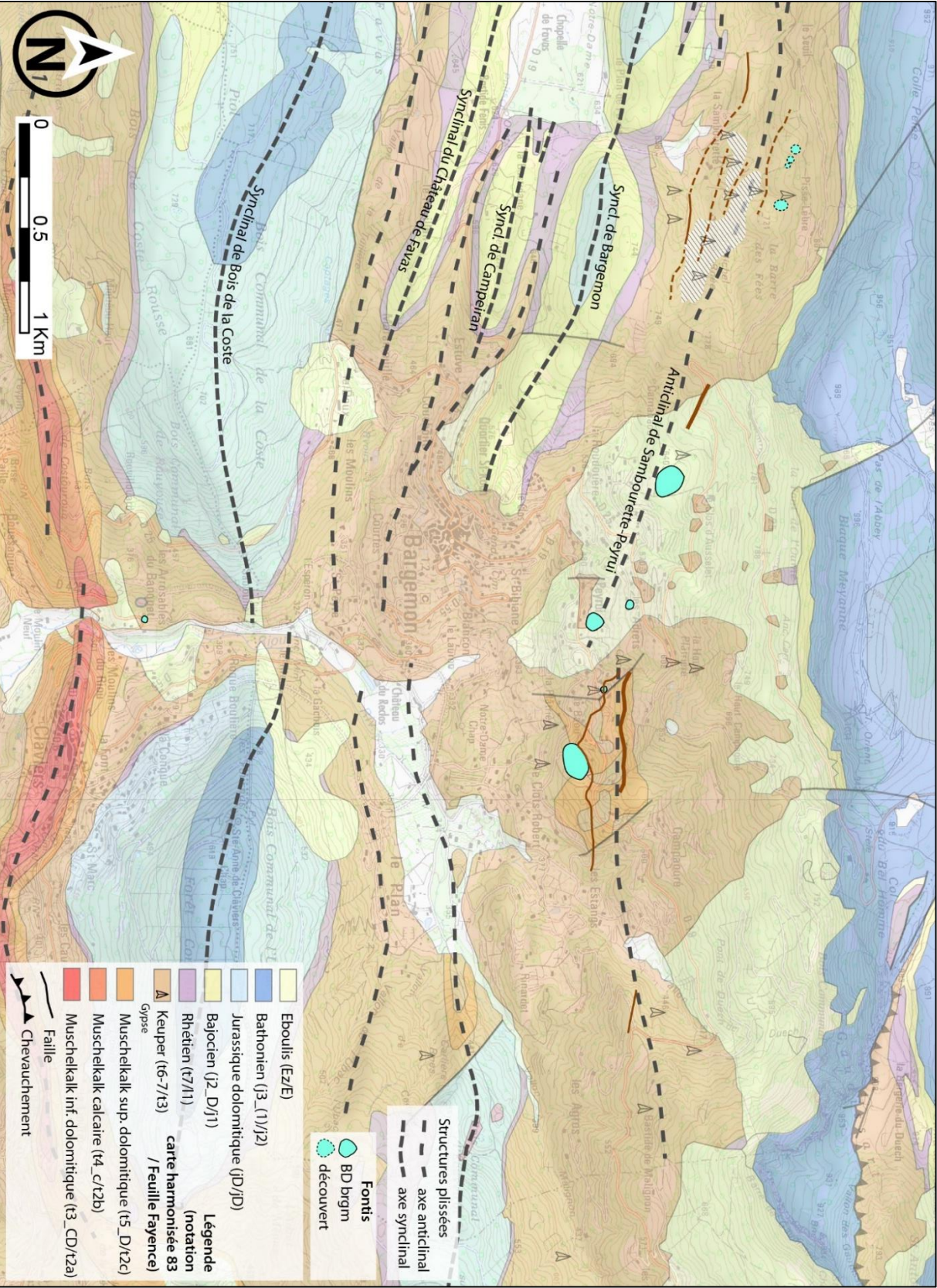


Illustration 27 : Extrait de la carte géologique harmonisée du Var dans le secteur de Bargemon, avec superposition des axes synclinaux et anticlinaux affectant les unités triasiques et jurassiques.

Par ailleurs, la carte géologique signale des occurrences dispersées de gypse (sous forme de symboles ponctuels), en particulier au nord-ouest (Sambourette, St-Michel), au nord-est (lieu-dit la Plâtrière) et à l'est (Clos Robert) de Bargemon. Leur représentation cartographique ne permet de statuer ni sur la position stratigraphique des lentilles de gypse au sein du Keuper, ni sur la configuration structurale de ces niveaux. Cela s'explique aisément par le comportement mécanique du gypse lors des déformations tectoniques, le dépôt de gypse initial fluant latéralement et verticalement et perdant toute cohérence géométrique (e.g. formation de diapirs).

Commentaire sur le raccordement des séries triasiques de Bargemon aux séries triasiques provençales et l'implication en termes d'occurrences gypsifères

Cette étude géologique a bénéficié de l'expertise de J.-P. Caron, spécialiste du Trias provençal, qui a visité quelques affleurements avec le géologue du BRGM lors de la première campagne de terrain. L'appui de ce spécialiste valide tout d'abord le fait que les faciès triasiques identifiés sur le terrain dans le secteur de Bargemon peuvent être corrélés avec le Trias provençal (Illustration 28). De plus un certain nombre de niveaux repères du Muschelkalk et du Keuper, identifiés par J.-P. Caron dans les années 1960 et 1970 (Caron et al. 1972, Caron 2011, Caron 2018 et références incluses), sont ainsi reconnus dans les environs de Clapiers et de Bargemon, avec de bas en haut, la présence de :

- calcaires gris fumé azoïques en bancs massifs reportés sur la carte géologique à 1/50 000 au « t2b » p.p., dont le faciès est typiquement celui du Muschelkalk inférieur ;
- calcaires gris parfois fossilifères, souvent bioturbés (à Rhizocorallium), en bancs relativement fins, également reportés sur la carte géologique à 1/50 000 au « t2b » p.p., dont le faciès est rapporté aux formations I et II du Muschelkalk supérieur ;
- calcaires bicolores souvent associés aux calcaires gris fumé, observés dans l'emprise de polygones attribués au « t2b », au « t2c » ou encore au « t3 » sur la carte géologique à 1/50 000, dont le faciès est rapporté à la formation III du Muschelkalk terminal.

Ces considérations lithostratigraphiques suggèrent donc que les unités gypsifères du Muschelkalk moyen sont présentes à Bargemon, encadrées stratigraphiquement par les unités du Muschelkalk inférieur et supérieur. Cependant, il n'est fait aucune mention d'occurrences directes de gypse dans le Muschelkalk dans la notice de la feuille Fayence, seul le Keuper étant gypsifère. Cette contradiction n'est vraisemblablement qu'apparente et ne reflète que notre incompréhension de la lithostratigraphie et de la structuration locale de ces séries triasiques. À noter cependant que le Muschelkalk inférieur dolomitique (Anhydritgruppe, noté "t2a" sur la feuille de Fayence), montre des faciès dolomitiques chaotiques, très broyés, qui furent soumis à une dissolution intense, suggérant la présence initiale de gypse/évaaporite.

Le Trias
de Bargemon
(notation
carte harmonisée
du Var/notice
Feuille Fayence)

Succession lithostratigraphique du Trias Provençal

	Epaisseur	Lithologie	Pétrographie	Notation	Φ	Etage	Description
Absent à Bargemon	Au moins 50 m		D	I1-2		Hettangien-Sinemurien	Dolomie claire et cloisonnée avec intercalations de marnes vertes
	5 à 10 m		C	t _{7b}		Rhétien supérieur	Calcaire beige à grain fin
Rhétien (t ₇ /I1)	45 à 50 m		M C	t _{7a}		Rhétien inférieur	Alternances de marnes vertes et de calcaire ocre-jaune
							Conglomérat fossilifère à <i>Avicula contorta</i>
Keuper (t ₆ -7/t ₃)	Quelques mètres à 30 m et plus		M G	t ₅₋₆	↔	Norien Keuper supérieur	Argiles rouges à quartz bipyramidés et gypse Φ ₃ = niveau de décollement
Muschelkalk sup. dolomitique (t ₅ _D/t ₂ c)	15 à 20 m		D Si	t ₄ IV	↔	Carnien Keuper inférieur	Marnes cloisonnées et argiles blanches Cargneules et silicifications Dolomies et calcaire dolomitique
	5 à 18 m		C	t _{3c} III		Muschelkalk supérieur	Calcaire bicolore à <i>Myophoria Goldfussi</i> et <i>Dentalium</i> Calcaire mameux à <i>Cenoteris vulgaris</i> , <i>Ceratites nodosus</i> , <i>Encrinurus</i> Calcaire à <i>Dasycladacées</i> et intercalations basaltiques (Rougiers, Blanque -225 MA)
Muschelkalk calcaire (t ₄ _c/t ₂ b)	22 à 55 m		C	t _{3c} II		Anisien	Calcaire mameux à <i>Cenoteris vulgaris</i> , <i>Ceratites nodosus</i> , <i>Encrinurus</i> Calcaire bioturbé à <i>Solenopores</i> , <i>Tolypanema</i>
	7 à 18 m		D	I			Dolomie, calcaire dolomitique et cargneules
	0 à 30 m		β				Intercalations basaltiques (Méounes, Tourves, Saint-Cyr sur mer, Bando)
	0 à 10 m		M		↔		Calcaire mameux et marnes blanches
	0 à 10 m		G				Amas gypseux Φ _{2b} = niveau de décollement
Absent à Bargemon ?	10 m		C	t _{3b}		Muschelkalk moyen	Calcaire gris fumée et calcaire dolomitique gris clair ?
	10 m		M			Anisien	Mame à intercalations ligniteuses ponctuelles ?
	0 à 25 m		M		↔		Mame, argile et gypse en amas lenticulaires Φ _{2a} = niveau de décollement
	3 à 5 m		C				Calcaire argileux finement lité
	5 à 10 m		D				Dolomie, calcaire et cargneule
Muschelkalk calcaire (t ₄ _c/t ₂ b)	50 m		C	t _{3a2}		Anisien	Calcaire gris fumée en bancs massifs avec intercalations de petits bancs bien stratifiés
	5 à 10 m		D				Calcaire, calcaire dolomitique et cargneule
Muschelkalk inférieur dolomitique (t ₃ _CD/t ₂ a)	0 à 30 m		M	t _{3a1}	↔	Anisien	Marnes, argiles et gypse en amas lenticulaires Φ ₁ = niveau de décollement
	5 m						Grès argileux à pseudomorphoses cubiques de cristaux de sel
Absent à Bargemon	60 à 80 m		Si Al	t ₂		Buntsandstein Olénékien	Grès dolomitiques clairs à ripples marks alternant avec des psammites et des grès argileux rouges à plans de sédimentation obliques
	1 à 10 m			t ₁		Induen	Grès grossiers et grès argilo-micacés avec nodules et plans de sédimentation obliques
	> 1000 m			r		Permien terminal	Conglomérat de base et grès quartzeux Pelites rouges

Illustration 28 : Corrélations lithostratigraphiques entre les unités triasiques décrites dans la notice de la feuille de Bargemon (à gauche) et celles typiques du Trias provençal (à droite ; J-P. Caron dans Villeneuve et al., 2018).

3.2.2. Les campagnes de terrain

Deux campagnes d'investigations géologiques sur le terrain ont été menées sur la commune de Bargemon, en juin 2019 (5 jours effectifs) et en mars 2020 (4,5 jours effectifs). 122 stations d'observation ont été visitées (Illustration 29).

Les objectifs de la première campagne de terrain étaient de (i) prendre connaissance du secteur d'étude et de passer en revue les différents faciès sédimentaires du Trias et du Jurassique sus-jacent, (ii) déterminer si le gypse du Keuper à l'est de Bargemon appartient à un seul niveau ou à plusieurs niveaux superposés, (iii) déterminer si le gypse à l'est de Bargemon forme des niveaux stratiformes à géométrie simple (monoclinale) et à faible continuité latérale ou s'il s'agit d'un seul et même niveau plissé, avec une continuité latérale relativement importante. Lors de cette campagne, les principales observations ont été menées dans les alentours de Bargemon - secteur du Peyrui en particulier - et de Claviers.

Les objectifs de la seconde campagne de terrain étaient de (i) valider les observations de la première campagne en étendant géographiquement les observations (secteur Sambourette), (ii) préciser les relations spatiales gypse-fontis(dolomie) et les géométries du gypse, (iii) comprendre la structuration interne du Keuper et du Muschelkalk, (iv) rechercher systématiquement la fracturation aux différentes échelles d'observation, et (v) discuter le découplage entre les séries sédimentaires du Keuper et celles du Muschelkalk sous-jacent. Lors de cette campagne, les principales observations ont été dans le secteur de la Sambourette et à l'est de Bargemon.

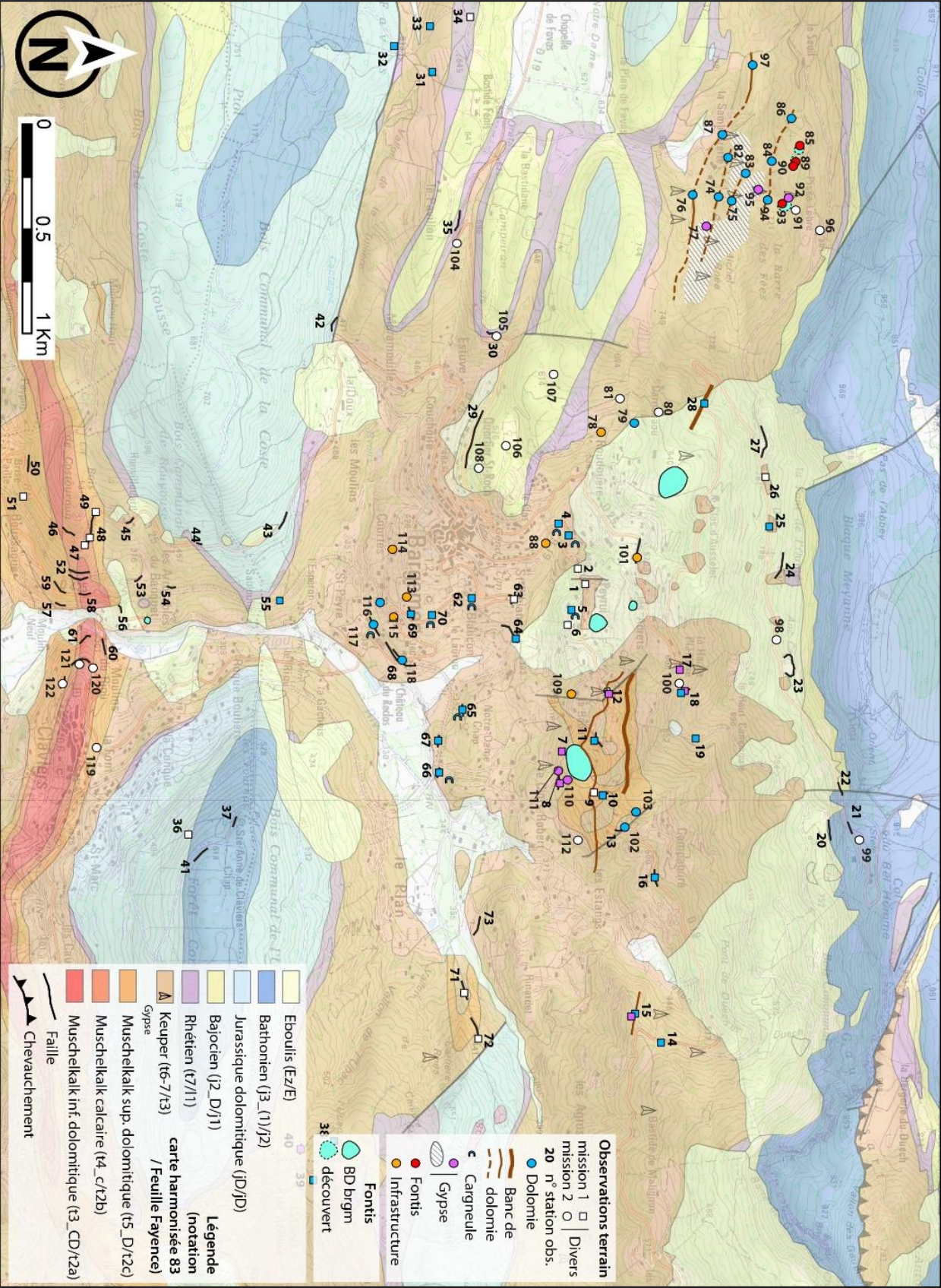


Illustration 29 : Carte de localisation des stations d'observation visitées au cours des 2 campagnes de reconnaissance sur le terrain.

3.2.3. Observations, interprétations et résultats

Cette section présente les principales observations géologiques réalisées sur le terrain et les interprétations et résultats que l'on peut en tirer.

a) Déformation des roches et géologie structurale

Cette section décrit les principales observations ayant trait à la déformation des roches, qu'elle soit matérialisée par des plis (synclinaux et anticlinaux) ou des fractures (déformation cassante). Toutes les observations et informations structurales sont rassemblées sur l'illustration 31.

■ Mesures terrain : la stratification

De manière générale, les plans de stratification (orientation des strates dans l'espace) dans les séries jurassiques sont orientés environ N100 avec des pendages faibles vers le nord ou vers le sud (de 10-30°) (Illustration 30); dans les séries triasiques, ces plans sont le plus souvent orientés à peu près ouest-est mais avec des valeurs de pendage plus variables (parfois proches de la verticale) (Illustration 30). Ces mesures sont en première approximation cohérentes avec la direction N110 des synclinaux/anticlinaux ouverts qui affectent les séries jurassiques ; les valeurs de pendage plus dispersées dans les séries triasiques traduisent directement les déformations plus marquées des lithologies impliquées, en relation avec la présence de roches extrêmement sensibles à la déformation (gypse ou d'argiles gypsifères).

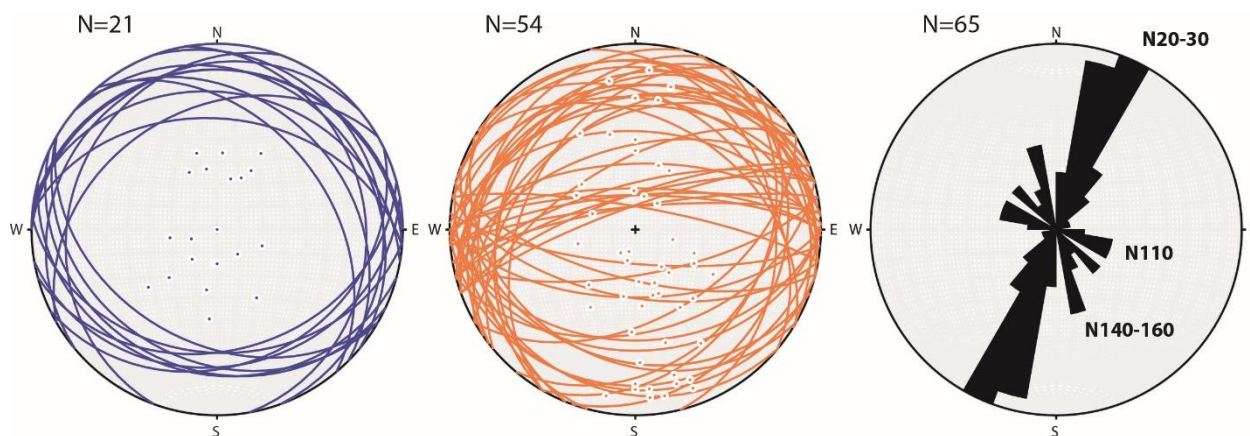
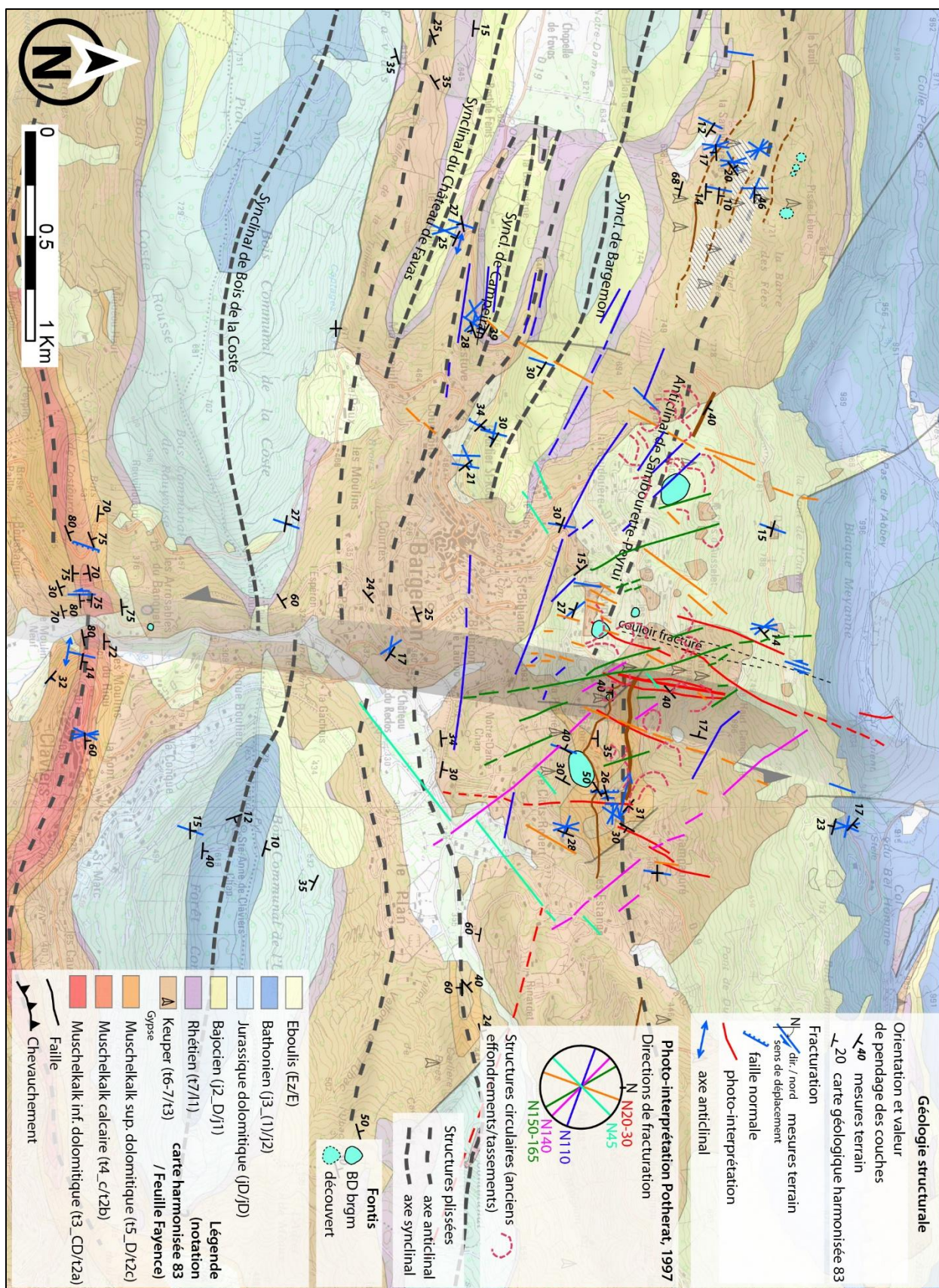
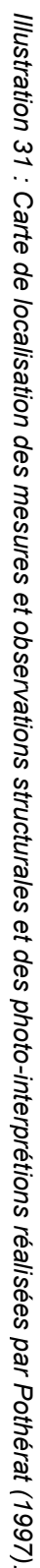


Illustration 30 : Représentation stéréographique (hémisphère inférieur) de la stratification des séries jurassiques (à gauche, pôles et plans), des séries triasiques (au centre, pôles et plans), et des directions de fracturation dans les séries jurassiques et triasiques (à droite, rose diagramme).



■ *Mesures terrain : la fracturation*

Les calcaires du Muschelkalk, les dolomies du Keuper et les calcaires jurassiques sont affectés par une intense fracturation (Illustration 32). Cette dernière a été systématiquement mesurée à l’affleurement ; la très grande majorité des mesures concerne des diaclases, seules de très rares failles avérées ont été observées. Ces mesures permettent d’avoir un aperçu général de la déformation cassante à l’échelle de la zone d’étude. La direction N10-N30 est très largement majoritaire (Illustration 33). Les directions N140-160 et plus rarement N110 sont aussi très présentes.



Illustration 32 : Exemple de fracturation sub-v verticale dans les dolomies du Keuper inférieur (2 plans de fracturation en rose et jaune), BAR083, localisation Illustration 29.



Illustration 33 : Exemple de fracturation sub-v verticale dans les calcaires du Jurassique (2 plans de fracturation en vert et bleu), BAR105, localisation Illustration 29.

Ces directions de fracturation se retrouvent aussi à l'échelle cartographique, comme le suggèrent les travaux de Pothérat (1997) à partir de l'interprétation de photos aériennes (orientations N20-30, N45, N110, N140 et N150-165 ; Illustration 30) ; elles sont spatialement associées aux effondrements connus dans le secteur de Bargemon et pourraient jouer un rôle dans le développement des effondrements via le drainage des aquifères et le développement de karsts.

À la suite de la première mission de terrain une analyse de photos aériennes a montré la présence d'une zone de fracturation orientée N20 au nord-ouest de Bargemon (Illustration 31). À noter aussi le décalage sénestre selon cette même direction N20 de l'axe du synclinal de la Coste par rapport à celui de Sainte Anne de Claviers et de l'axe de l'anticlinal de Claviers, et possiblement des axes anticlinaux situés plus au nord, dont celui de Sambourette-Peyrui (Illustration 31). Ces observations permettent d'envisager l'existence d'une zone décrochante sénestre orientées N20 reliant le col du Bel-Homme au nord à Claviers au sud (en grisée sur l'Illustration 31). En première approximation elle peut être interprétée comme associée à des failles de transfert accommodant les raccourcissements lors de la compression alpine et du développement des synclinaux-anticlinaux. La direction N20 apparaît donc comme une direction de fracturation remarquable dans le secteur d'étude, et ce à toutes les échelles.

▪ *Coupes géologiques*

Les coupes géologiques donnent un aperçu de la disposition des couches géologiques en profondeur le long du tracé de coupe ; les quatre coupes construites sont localisées sur l'Illustration 34. En l'absence de données de calage en profondeur (très rares forages), ces coupes restent très largement interprétatives, en particulier pour ce qui concerne les séries triasiques.

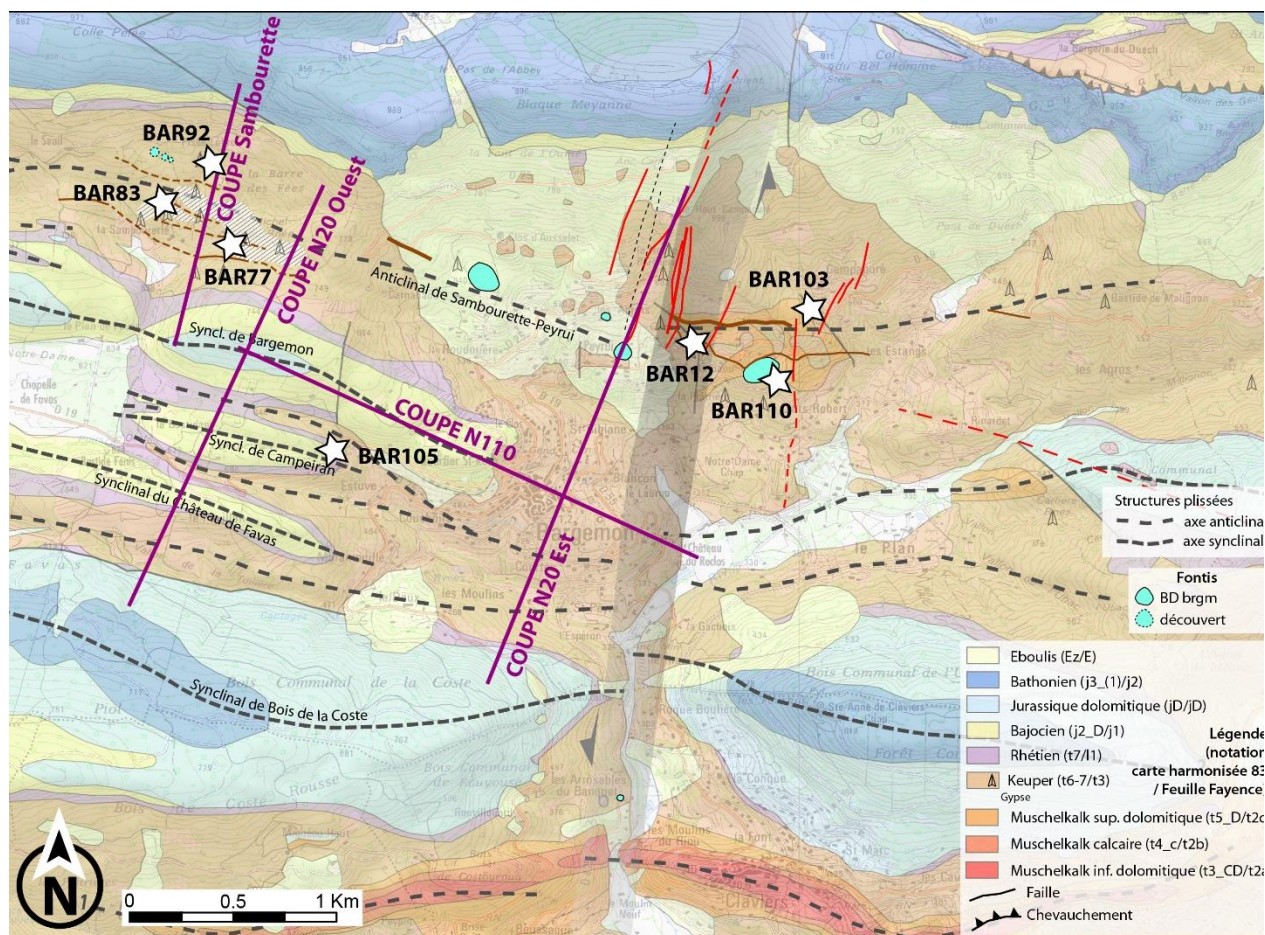


Illustration 34 : Localisation des coupes géologiques et des photos d'affleurement.

La coupe orientée N110 (Illustration 35), parallèle aux axes des plis synclinaux et anticlinaux, montre le pendage général vers l'est de l'ensemble de la pile sédimentaire (Trias + Jurassique).

La coupe N20 ouest, perpendiculaire aux axes des plis synclinaux et anticlinaux, permet d'imager ces derniers ; des niveaux de décollement tectonique (chevauchements) intra-Trias sont suggérés (traits tirés gris). La coupe N20 image aussi les plis synclinaux et anticlinaux ainsi que l'effondrement du Peyrui ; des niveaux de décollement tectonique (chevauchements) intra-Trias sont ici aussi suggérés (traits tirés gris). L'anticlinal de Sambourette-Peyrui est bien identifié.

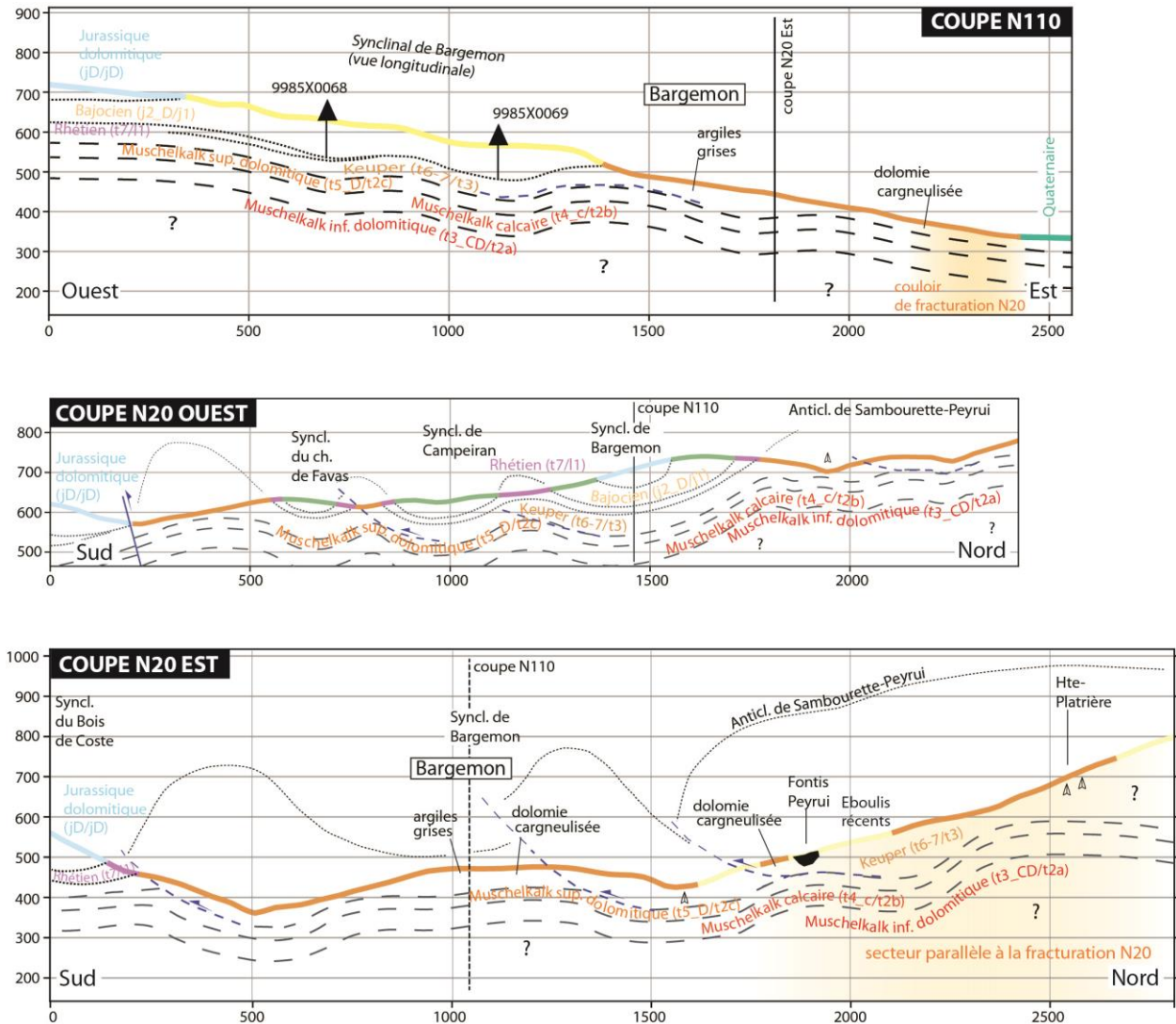


Illustration 35 : Coupes géologiques N110, N20 Ouest et N20 Est, localisation sur l'illustration 29.

Relations géométriques et structurales entre le Keuper vs du Muschelkalk

Les séries sédimentaires du Muschelkalk montrent dans le secteur de Clavières une structuration en plis anticlinaux serrés, d'origine tectonique alpine (BAR52, BAR 57-59, BAR119-122). Ce type de structure plicative n'est jamais observée dans le Keuper sus-jacent d'où l'hypothèse de l'existence d'un découplage structural entre les deux entités.

Dans le secteur de Bargemon le Muschelkalk ne montre pas de structuration en plis anticlinaux serrés, mais plutôt en plis ouverts (BAR103, Illustration 36). L'emprise cartographique du Muschelkalk, *a priori* délimitée par des failles (donc sans extension longitudinale est-ouest importante comme à Clavières), ne pointe pas en faveur d'une géométrie similaire à celle observée dans le secteur de Clavières (hypothèse utilisée lors de la construction des coupes géologiques, cf. Illustration 35). Un découplage structural Muschelkalk-Keuper n'est cependant pas à exclure, les masses de gypse, comme celle situées à la base du Keuper, pouvant être remobilisées même en l'absence de déclencheur tectonique fort.



Illustration 36 : Anticlinal ouvert d'axe N100-120 dans les dolomies du Muschelkalk (t2c), vue vers l'ouest, BAR103, localisation Illustration 34.

b) Géométrie et déformation interne du Keuper, influence du gypse

La géométrie des terrains composant le Keuper se caractérise dans le détail par des plis d'amplitude pluri décamétrique et de longueur d'onde hectométrique. Le plissement se déduit en particulier des variations de pendage des bancs dolomitiques associés spatialement aux masses de gypse. Ce type de géométries plicatives a été observé à l'est de Bargemon et dans le secteur de la Sambourette (Illustration 37).

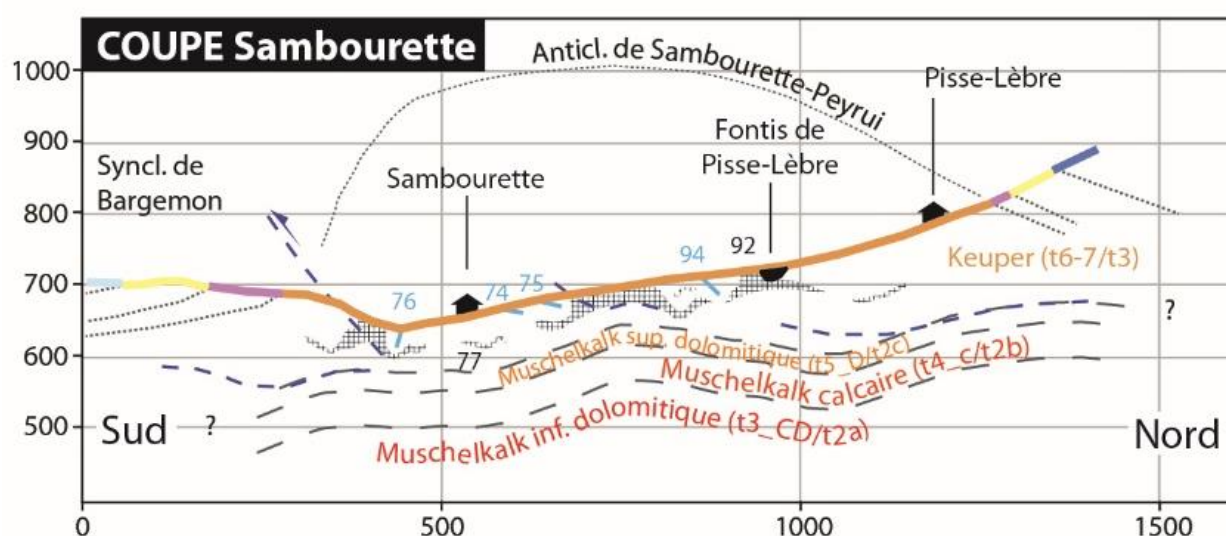


Illustration 37 : Coupe géologique de la Sambourette, localisation sur l'illustration 34.

À une échelle inférieure, cette masse de gypse se trouve géométriquement au cœur de l'anticlinal de la Sambourette-Campaouré d'orientation N110 ; le développement des épaisseurs maximales de gypse (zones grisées) se trouve au cœur de ce pli (« bourrage de charnière »).

c) Les occurrences de gypse - Distinction, répartition spatiale et stratigraphique

Il est possible de différencier deux types d'occurrence de gypse à l'échelle de la commune en fonction de leur apparence, de leur relation avec les autres lithologies du Keuper et de leur épaisseur.

A- Un niveau de gypse bien visible, se présentant soit sous une masse stratiforme (BAR007, BAR008, BAR012), plutôt continue et d'épaisseur pluri-métrique, soit par endroit sous une forme diapirique (BAR092, Illustration 38) atteignant parfois jusqu'à plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur (Baou, Illustration 39). Ces occurrences sont souvent associées avec une barre dolomitique située juste au-dessus (Illustration 40). Ce niveau pourrait être rattaché au gypse panaché de la notice de la carte géologique dans laquelle il est le seul niveau individualisé.



Illustration 38 : Mini diapir de gypse, station BAR092, localisation Illustration 34.



Illustration 39 : Le diapir de gypse du Baou, paroi sud-est de l'effondrement (25 mètres à l'ouest de BAR110), localisation Illustration 34.

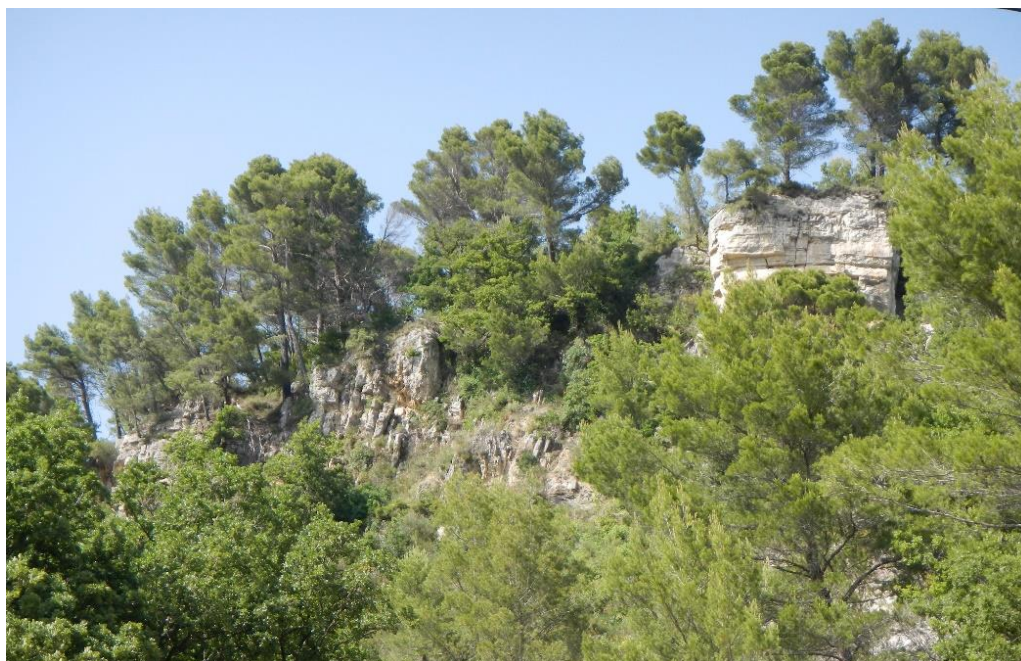


Illustration 40 : Barre dolomitique pluri métrique jaunâtre à litage net, située à une dizaine de mètres au-dessus stratigraphiquement d'un niveau de gypse exploitée artisanalement (station BAR012). À noter la fracturation subverticale très nette de direction N010-020 affectant cette barre sur la gauche de la photographie, localisation Illustration 34.

B- Des niveaux à gypse composés de masses informes de gypse, décimétriques à pluri métriques, isolées au sein d'argiles gypsifères versicolores et marnes vertes à lits dolomitiques centimétriques (BAR017, BAR040, BAR077, BAR095 ; Illustration 41). Ces niveaux pourraient

être rattachés aux gypses décrits à la base du Keuper dans la notice de la carte géologique. L'hypothèse qu'ils soient génétiquement liés aux gypses massifs n'est cependant pas à exclure.



Illustration 41 : Affleurement isolé de gypse et argiles gypsifères versicolore (BAR077), localisation Illustration 34.

Ces deux occurrences de gypse sont attribuées stratigraphiquement au Keuper indifférencié, les investigations menées ne permettent pas de statuer sur leur appartenance au Keuper inférieur ou supérieur. L'hypothèse d'une appartenance au Muschelkalk moyen n'est pas à exclure pour le niveau de gypse le plus épais.

d) Les fontis - nouvelles occurrences et distribution spatiale à l'échelle de la commune

Trois nouveaux fontis dans les séries du Keuper ont été découverts au nord du lieu-dit La Sambourette ; le fontis de Pisse-Lèbre, déjà identifié, est aussi décrit (Illustration 42).

Nom	Station	Latitude	Longitude	Diamètre	Profondeur	Photo
Fontis Sambourette 1	BAR085	N43°38'9.43"	E6°31'40.57"	≈35-40 m	≈20 m	Illustration 38
Fontis Sambourette 2	BAR089	N43°38'8.72"	E6°31'44.04"	≈30 m	≈15 m	Illustration 39
Fontis Sambourette 3	BAR090	N43°38'8.29"	E6°31'44.98"	≈20 m	≈10-15 m	Illustration 40
Fontis de Pisse-Lèbre	BAR093	N43°38'6.4"	E6°31'52.98"	≈60x40 m	≈20 m	-

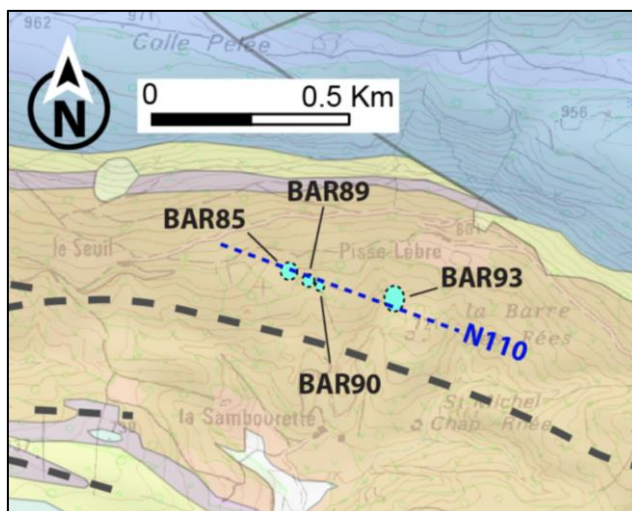


Illustration 42 : Carte de localisation des fontis nouvellement découverts dans le secteur de Sambourette (BAR85-89-90) et du fontis de Pisse-Lèbre (BAR93), déjà répertorié. Voir l'illustration 34 pour la légende.

Ces fontis sont cachés dans la forêt, les arbres ont repoussé à l'intérieur des trous et leurs parois sont végétalisées (Illustration 34, Illustration 44, Illustration 45); ils se sont formés il y a certainement plusieurs dizaines d'années. Ils ne semblent cependant pas visibles sur la photographie aérienne de 1958 (échelle 1/25000, époque à laquelle il y avait beaucoup moins d'arbres qu'aujourd'hui) (Illustration 46), ce qui laisse supposer qu'ils sont postérieurs à cette date.



Illustration 43 : Fontis de la Sambourette 1 ; vue vers le sud (BAR085).



Illustration 44 : Fontis de la Sambourette 2 ; vue vers l'ouest (BAR089).



Illustration 45 : Fontis de la Sambourette 3 ; vue vers l'ouest (BAR090).

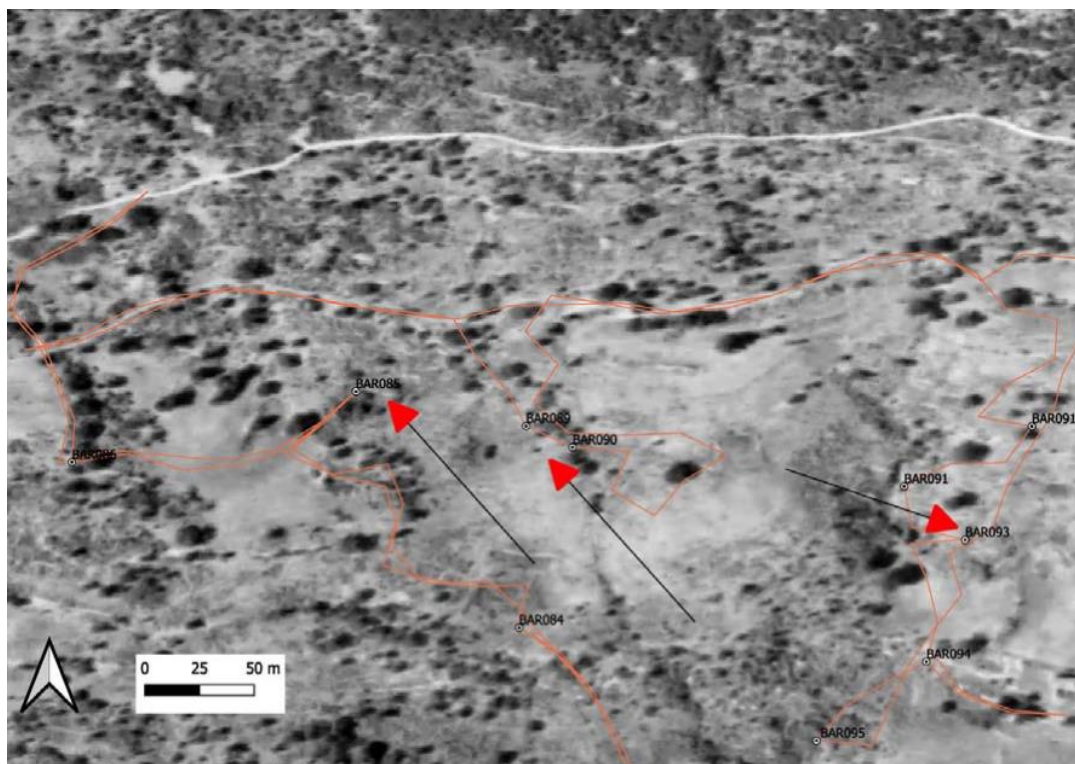


Illustration 46 : Localisation des fontis (non visibles) sur la photographie aérienne de 1958.

Distribution spatiale, relations avec les structures tectoniques

À l'issue de l'ensemble des investigations géologiques réalisées, il apparaît que tous les fontis, depuis la Sambourette jusqu'à l'est de Bargemon sont alignés selon une direction N110 et se trouvent dans le cœur de l'anticlinal Sambourette Campaouré axe N110 (Illustration 47). Par ailleurs les fontis sont souvent associés structuralement à des masses de gypse ; quand ces dernières sont observées, elles se présentent le plus souvent sous la forme de diapirs d'épaisseurs pluri-décamétriques.

De plus, au moins pour ce qui concerne les fontis du secteur de Bargemon, ils sont localisés sur ou à proximité de failles cartographiques de direction N010-020 (Illustration 47).

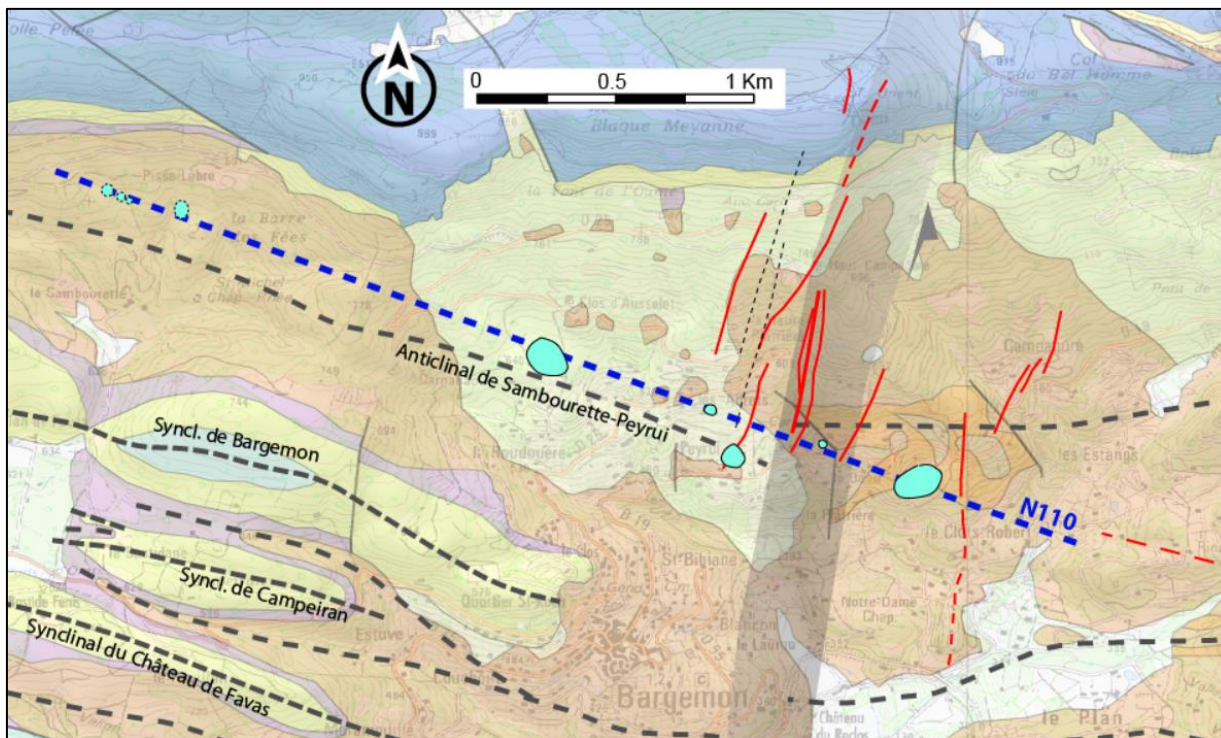


Illustration 47 : Alignement selon une direction N110 des fontis connus sur la commune de Bargemon. Voir l'illustration 34 pour la légende.

3.2.4. Résumé des principaux résultats et conclusion de l'étude géologique

- les séries sédimentaires du Jurassique et du Trias (Keuper et Muschelkalk) sont affectées de plis anticlinaux et synclinaux d'axe N110 ; leurs géométries supposées en profondeur sont imagées le long de quatre coupes géologiques ;
- les calcaires du Muschelkalk, les dolomies du Keuper et les calcaires jurassiques sont affectés par une intense fracturation (diaclasses), principalement de direction N10-N30 ;
- les masses de gypse se trouvent géométriquement au cœur de l'anticlinal de la Sambourette-Campaouré d'orientation N110 ; le développement des épaisseurs maximales de gypse se trouve au cœur de ce pli (« bourrage de charnière ») ;
- il est possible de différencier deux types d'occurrence de gypse à l'échelle de la commune de Bargemon :
 - un niveau de **gypse bien visible**, se présentant soit sous une masse stratiforme **plutôt continue** et **d'épaisseur pluri-métrique**, soit par endroit sous une forme diapirique atteignant **parfois jusqu'à plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur**. Ces occurrences sont souvent associées avec une barre dolomitique située juste au-dessus. Ce niveau pourrait être rattaché au gypse panaché de la notice de la carte géologique dans laquelle il est le seul niveau individualisé,
 - des niveaux à gypse composés de **masses informes de gypse, décimétriques à plurimétriques, isolées** au sein d'argiles gypsifères versicolores et marnes vertes à lits dolomitiques centimétriques Ces niveaux pourraient être rattaché aux gypses décrits à la base du Keuper dans la notice de la carte géologique.

Ces deux occurrences de gypse sont attribuées stratigraphiquement au Keuper Indifférencié, les investigations menées ne permettent pas de statuer sur leur appartenance au Keuper inférieur

ou supérieur. L'hypothèse d'une appartenance au Muschelkalk moyen n'est pas à exclure pour le niveau de gypse le plus épais.

- trois nouveaux fontis (post 1958 ?) dans les séries du Keuper ont été découverts au nord du lieu-dit La Sambourette ;
- tous les fontis, depuis la Sambourette jusqu'à l'est de Bargemon sont alignés selon une direction N110 et se trouvent dans le cœur de l'anticlinal Sambourette Campaouré d'axe N110. Les fontis sont de plus associés structuralement à des masses de gypse ; quand ces dernières sont observées, elles se présentent le plus souvent sous la forme de diapirs d'épaisseurs pluri décamétriques. Enfin, au moins pour ce qui concerne les fontis du secteur de Bargemon, ils sont localisés sur ou à proximité de failles cartographiques de direction N010-020.

Ces conclusions servent de guide à l'interprétation hydrogéologique et géophysique et sont à prendre en compte lors de l'analyse de risque à l'échelle de la commune.

3.2.5. Perspectives

Reste que la représentation cartographique à une échelle plus détaillée pourrait très certainement permettre d'approcher un peu mieux la structuration réelle des terrains triasiques (comme c'est le cas sur d'autres cartes géologiques à échelle 1/50 000 de Provence).

Seul un travail systématique de cartographie détaillée (à échelle 1/10 000 par exemple) permettra de lever toutes les ambiguïtés sur le nombre de niveaux de gypse et leur répartition spatiale. Ce qui pourrait très certainement permettre d'approcher un peu mieux la structuration réelle des terrains triasiques (comme c'est le cas sur d'autres cartes géologiques à échelle 1/50 000 de Provence).

Ce travail de cartographie doit être accompagné par une description détaillée des faciès sédimentaires des différentes unités lithostratigraphiques carbonatées rencontrées sur la commune de Bargemon. Ce qui permettrait d'attribuer stratigraphiquement ces différentes unités et ainsi mettre de l'ordre dans la succession stratigraphique du Muschelkalk et du Keuper.

Le rôle des accidents N20 dans la localisation (géométrie) du gypse et dans la genèse des effondrements reste à élucider ; une étude microstructurale permettrait de préciser la cinématique, et l'analyse des parois de l'effondrement de Peyrui (tout comme celui de Claviers) pourrait permettre de vérifier si une fracturation associée à cette direction est constatée.

Le découpage Keuper- Muschelkalk est aussi à rediscuter.

3.3. SYNTHÈSE HYDROGÉOLOGIQUE À L'ÉCHELLE DE LA COMMUNE ET DU CENTRE VILLAGE, MODÈLE CONCEPTUEL DU FONCTIONNEMENT HYDROGÉOLOGIQUE DES AQUIFÈRES

3.3.1. Objectifs de l'approche hydrogéologique

L'approche hydrogéologique vise à mener une analyse du contexte hydrogéologique de la commune de Bargemon au regard du phénomène de dissolution du gypse. L'objectif est de déterminer le rôle de l'eau dans les désordres liés à la dissolution du gypse mais également de participer à l'identification des zones concernées par la présence de gypse par l'analyse des caractéristiques chimiques des eaux circulant sur la commune.

L'objectif est d'établir un modèle conceptuel du fonctionnement hydrogéologique des aquifères en présence ainsi qu'une cartographie de synthèse de l'hydrogéologie à l'échelle de la commune.

3.3.2. Principe de dissolution du gypse

Le descriptif des mécanismes de dissolution du gypse présenté dans le guide de L'INERIS et du CEREMA (INERIS et CEREMA, 2018) est repris ci-après pour décrire ensuite les méthodes mises en œuvre dans l'étude pour pister ce phénomène dans les différents écoulements d'eau sur la commune de Bargemon.

Le gypse est une roche soluble. La mise en solution des éléments qui constituent la roche correspond au mécanisme de dissolution. Lorsqu'on immerge du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) dans une eau qui n'a jamais été en contact avec ce minéral, les éléments chimiques qui le constituent vont passer en solution sous forme d'ions. Une réaction de dissolution se met alors en place car l'eau est en état de sous-saturation en ions Ca^{2+} et SO_4^{2-} par rapport à la quantité de ces deux ions présente dans le gypse (Charmoille et Lecomte, 2011). Cette étape correspond à la phase 1 présentée sur l'illustration 43. La dissolution va alors se poursuivre jusqu'à ce que la quantité d'ions Ca^{2+} et SO_4^{2-} en solution soit en équilibre avec le minéral (phase 2 de l'illustration 43). Les conditions pour atteindre cet équilibre dépendent principalement de la température et de la pression existantes. Par exemple dans les conditions de pression atmosphérique, la solubilité varie quasi linéairement entre 0 et 20°C, de 2,15 à 2,53 g/l et présente un optimum de 2,67 g/l à 40°C (Daupley *et al.*, 2015). En comparaison, la solubilité du sel (NaCl) est de l'ordre de 350 g/l et celle de la calcite (CaCO_3) varie de 0,1 à 0,2 g/l en fonction de la pression partielle de CO_2 .

Pour qu'un processus de dissolution se mette en place, il faut donc que le fluide qui est en contact avec le minéral soluble (le gypse) soit sous-saturé. Pour garantir la sous-saturation de ce fluide au cours du temps et par conséquent le maintien du processus de dissolution, il est nécessaire que l'écoulement de ce fluide soit suffisant pour le renouveler régulièrement au contact du solide.

L'état de saturation en gypse d'un point d'eau et sa localisation sur une zone étudiée renseigne sur l'existence ou l'absence de phénomènes de dissolution en amont et sur le potentiel de dissolution en aval. Les schémas des illustrations 48 et 49 présentent les différents cas de figure possible.

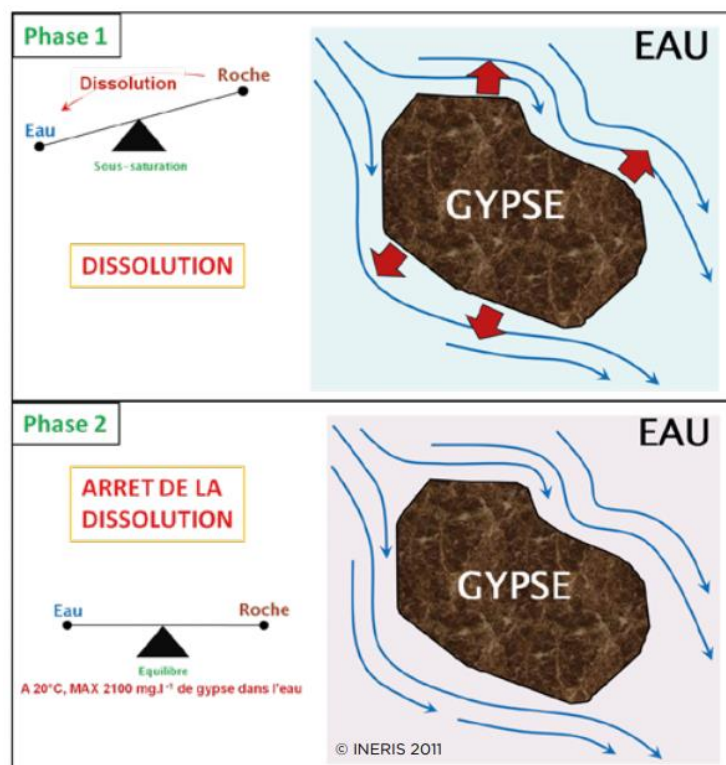


Illustration 48 : Principe général de mise en place d'un mécanisme de dissolution du gypse (Ineris et Cerema, 2018).

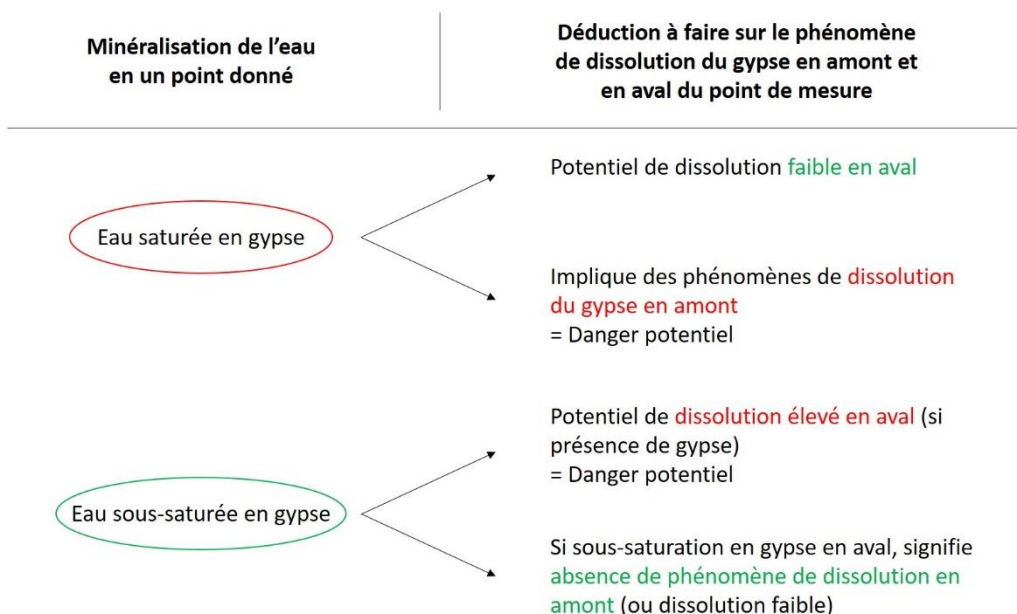


Illustration 49 : Schéma du lien à établir entre la minéralisation d'un point d'eau et le phénomène de dissolution du gypse à déduire en amont et en aval.

3.3.3. Moyens et méthodes mises en œuvre

a) Synthèse bibliographique

Dans un premier temps, une étude de la bibliographie disponible a été menée afin de rassembler les connaissances existantes sur l'hydrogéologie des formations géologiques présentes à Bargemon et qui concernent le secteur nord-est du Var en général. L'objectif est de déterminer le contexte hydrogéologique à l'échelle régionale pour éclairer ensuite les phénomènes hydrogéologiques identifiés sur la commune.

Ensuite, un important travail de terrain a été mené.

b) Description des écoulements d'eau sur la commune

Un recensement des points d'eau et écoulements a été réalisé (sources, fontaines, puits, forages, canaux, ruisseaux) notamment à partir d'enquêtes auprès des employés communaux et des riverains.

L'origine des écoulements a été étudiée et en particulier le contexte géologique et hydrogéologique des émergences naturelles (sources). Des observations de la gestion des eaux de ruissellement et d'infiltration ont été menées, en particulier au voisinage des désordres recensés.

Pour clarifier l'origine des écoulements de certains canaux du centre-ville, un traçage à la fluorescéine a été réalisé avec l'aide de la mairie. Le colorant a été injecté à la source du Clos et son passage a été observé à l'œil nu sur l'ensemble des fontaines du village et les canaux principaux afin d'identifier ceux qu'elle alimente.

c) Mesure des paramètres physico-chimiques et campagnes de prélèvement

La dissolution du gypse induit une mise en solution des ions calcium et sulfates, ce qui se traduit par une augmentation de la minéralisation de l'eau. La mesure de la conductivité électrique¹⁷ permet donc de différencier les différents pôles de minéralisation des eaux et d'identifier les eaux impactées par la dissolution du gypse.

Un total de huit campagnes de mesure a été réalisé sur les différents points d'eaux recensés (Illustration 50) réparties entre juin 2019 et février 2022. Sur chaque campagne, entre trente et cinquante points d'eau ont fait l'objet de mesures de la conductivité électrique, en fonction de la situation hydrique déterminant la présence effective d'écoulement sur les points d'eau temporaires. Il est également à noter que certains points d'eau (sources en particulier) ont été découverts tardivement sur le déroulé de l'étude et qu'ils n'ont pu faire l'objet que de quelques mesures.

¹⁷ La conductivité est la mesure de la capacité d'une eau à conduire un courant électrique. La conductivité varie en fonction de la température. Elle est liée à la concentration et à la nature des substances dissoutes dans l'eau.

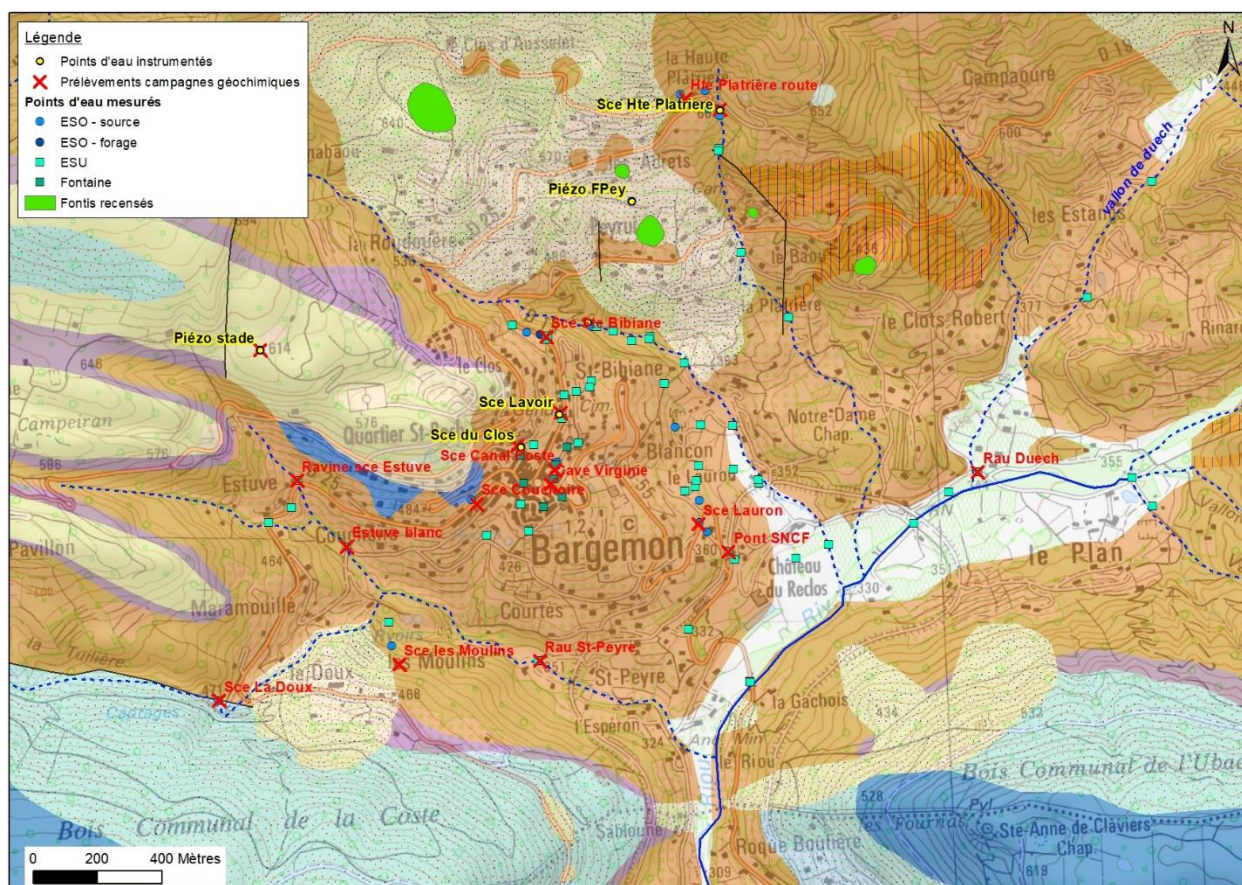


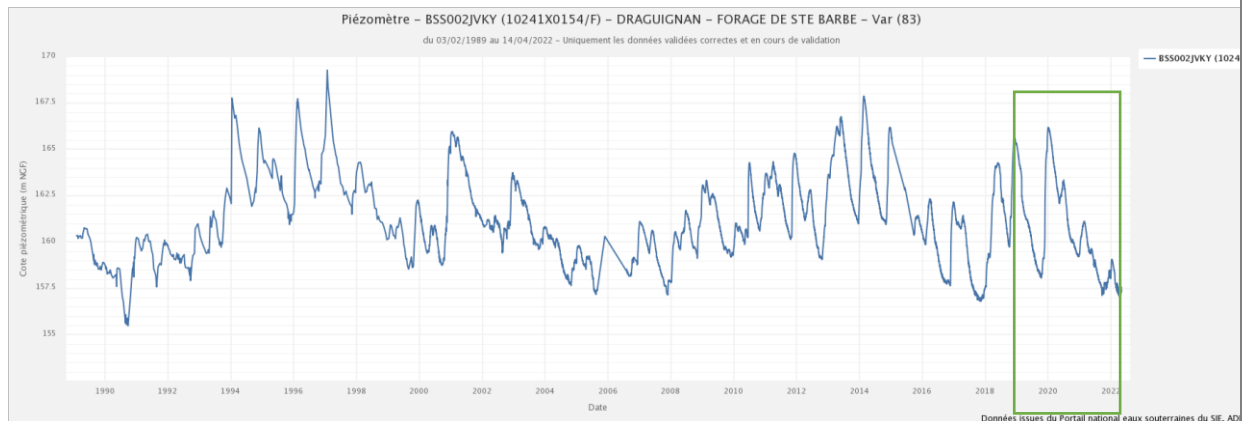
Illustration 50 : Localisation des points d'eau de mesure de la conductivité électrique, des points prélevés pour les campagnes géochimiques et des points instrumentés sur fond de carte géologique harmonisée à échelle du 1/50 000 (@BRGM, cf. § 3.2.2 pour la légende).

Deux campagnes de prélèvements ont également été réalisées sur quatorze points (Illustration 51). Ces analyses chimiques ont pour objectif d'identifier l'origine de la minéralisation de l'eau (les ions majeurs), des conductivités élevées pouvant être liées à d'autres éléments chimiques que le calcium et les sulfates. Elles permettent, de façon générale, de retracer les milieux traversés par l'eau et ainsi de décrire l'organisation des écoulements au sein des différentes formations géologiques en présence.

La première campagne de prélèvement a eu lieu en période de basses eaux en juin 2019. La seconde a eu lieu en période de hautes eaux et a été réalisée en deux fois : la première partie des échantillons a été prélevée en décembre 2019 et la seconde en janvier 2020.

Le report des campagnes de prélèvement et de mesure sur la chronique du piézomètre DCE de Draguignan suivi depuis 1989 (Illustration 51) permet d'illustrer les conditions hydriques du secteur. Il est notamment à noter que la campagne de prélèvement de fin 2019/début 2020 est synchrone d'une phase de recharge majeure des aquifères du secteur suite aux importantes précipitations qui ont eu lieu en novembre 2019. Les années 2020 et 2021 sont en revanche marquées par une faible recharge.

De 1989 à 2022 :



Zoom sur la période janvier 2019 à avril 2022 :

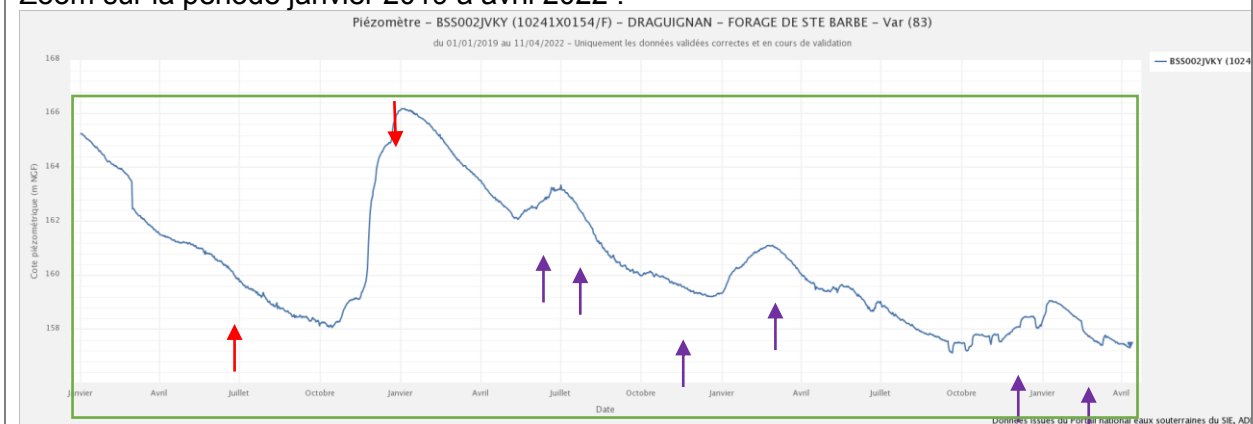


Illustration 51 : Chronique piézométrique du piézomètre DCE de Draguignan permettant d'illustrer la situation hydrique des campagnes de prélèvement (en rouge) et de mesure (en violet).

d) Analyses géochimiques réalisées

Les éléments majeurs et traces ont été analysés lors des deux campagnes ainsi que les isotopes stables de la molécule ($d^{18}O$, d^2H) d'eau lors de la campagne de juin 2019. Parmi les éléments analysés figurent le strontium et le bore qui apporteront des informations sur la nature des sels mobilisés dans le Keuper (gypse ou halite).

Les eaux prélevées ont été conditionnées sur le terrain. Pour les anions et les cations, les eaux ont été filtrées à $0,45 \mu m$ et conditionnées dans des flacons de 125 ml en polyéthylène haute densité (PE-HD). In situ, les échantillons destinés à l'analyse des cations ont été acidifiés à $pH < 2$ avec de l'acide nitrique 1M Suprapur. Pour les isotopes stables de l'eau ($^{18}O/^{16}O$ et $^2H/^1H$), le prélèvement se fait dans un flacon de 60 ml avec de l'eau brute.

Les analyses chimiques (majeurs et traces) de la première campagne ont été réalisées au laboratoire de chimie de l'eau HSM (HydroSciences Montpellier). L'alcalinité totale a été mesurée par titrage acide avec HCl 0,1N. Les ions majeurs ont été analysés par chromatographie ionique (ICS 1000 Dionex®). L'erreur de précision est inférieure $\pm 5 \%$. Les éléments traces ont été analysés avec Q-ICPMS (iCAP Q, Thermo Scientific® équipé d'un système en ligne de dilution de gaz argon) après acidification à l'acide nitrique.

Les analyses chimiques des majeurs et traces de la seconde campagne ont été réalisées au laboratoire du BRGM. L'alcalinité a été mesurée par potentiométrie par électrode sélective. Les anions ont été analysés par chromatographie ionique et les cations par spectrométrie d'émission atomique. Enfin, les éléments traces ont été analysés par spectrométrie de masse couplée à un plasma inductif.

Les isotopes stables de l'eau ont été mesurés sur un spectromètre de masse Isoprime au laboratoire LAMA d'HydroSciences Montpellier de l'Université de Montpellier avec une précision de $\pm 0,06 \text{ ‰}$ pour l'oxygène 18 et de $\pm 0,7 \text{ ‰}$ pour le deutérium ($\text{d}2\text{H}$).

e) Généralités sur les isotopes stables de la molécule d'eau ($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$)

L'oxygène 18 et le deutérium sont des traceurs intrinsèques de la molécule d'eau. La détermination des teneurs en oxygène 18 et deutérium des eaux permet la comparaison avec la recharge (fonction d'entrée) par l'intermédiaire de la droite des eaux météoriques.

Les variations des compositions isotopiques des isotopes stables de l'eau ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ et $2\text{H}/1\text{H}$) dans le cycle hydrologique résultent soit de fractionnement isotopique qui intervient lors des changements de phase (évaporation, condensation), soit de mélanges d'eaux de compositions isotopiques différentes. L'évaporation entraîne toujours la formation de vapeur appauvrie en isotopes lourds par rapport au liquide d'origine (fractionnement isotopique). À l'inverse, lors de la condensation, la phase condensée (pluie par exemple) est toujours enrichie en isotopes lourds au détriment de la phase vapeur résiduelle (nuage). Ainsi, les précipitations deviennent de plus en plus appauvries en oxygène 18 et en deutérium lorsque l'altitude s'élève. Une fois dans la nappe (après transfert dans la zone non saturée), la composition isotopique de l'eau ne varie plus.

Les compositions isotopiques sont exprimées en rapports de concentrations par rapport à un standard. En général, les effets isotopiques sont faibles et la différence entre les valeurs obtenues à partir d'un échantillon d'eau et celles du standard sont très proches. On utilise ainsi la notion δ (delta) qui exprime la différence relative (en ‰) d'atomes de l'isotope léger entre l'échantillon et un standard international :

$$\delta^{18}\text{O} = ((^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{échantillon}} / (^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{standard}}) \times 1000$$

$$\delta^2\text{H} = ((^2\text{H}/^1\text{H})_{\text{échantillon}} / (^2\text{H}/^1\text{H})_{\text{standard}}) \times 1000$$

Le standard est le Standard Mean Ocean Water (V-SMOW). Il correspond à une eau hypothétique ayant des rapports isotopiques en ^{18}O et ^2H identiques à ceux d'eau océanique « moyenne ».

À l'échelle mondiale, les teneurs en deutérium des pluies sont reliées aux teneurs en oxygène 18 par la relation suivante : $\delta^2\text{H} = 8 \cdot \delta^{18}\text{O} + 10$, couramment appelée droite mondiale des eaux météoriques (GMWL, Craig 1961). Les résultats des analyses menées dans le cadre de la présente étude seront comparés à cette droite ainsi qu'à la droite des eaux météoriques de la Méditerranée occidentale ($\delta^2\text{H} = 8 \cdot \delta^{18}\text{O} + 13,7$; Celle, 2000). Le gradient isotopique altitudinal des précipitations est, selon la littérature, compris entre $-0,2 \text{ ‰}/100 \text{ m}$ et $-0,3 \text{ ‰}/100 \text{ m}$. Cette propriété singulière des isotopes de l'eau peut être utilisée pour évaluer les altitudes de recharge des eaux souterraines.

Sous certaines conditions (temps de résidence élevé, faible rapport Eau/Roche, température élevée du réservoir, échanges avec le CO_2), les interactions Eau-Roche peuvent modifier la composition isotopique initiale de l'eau (Illustration 52 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). En l'absence d'évaporation ou d'échange avec des gaz dissous, les isotopes stables de la

molécule d'eau se comportent comme des traceurs conservatifs et reflètent le mélange des différentes recharges ayant alimenté les eaux souterraines considérées.

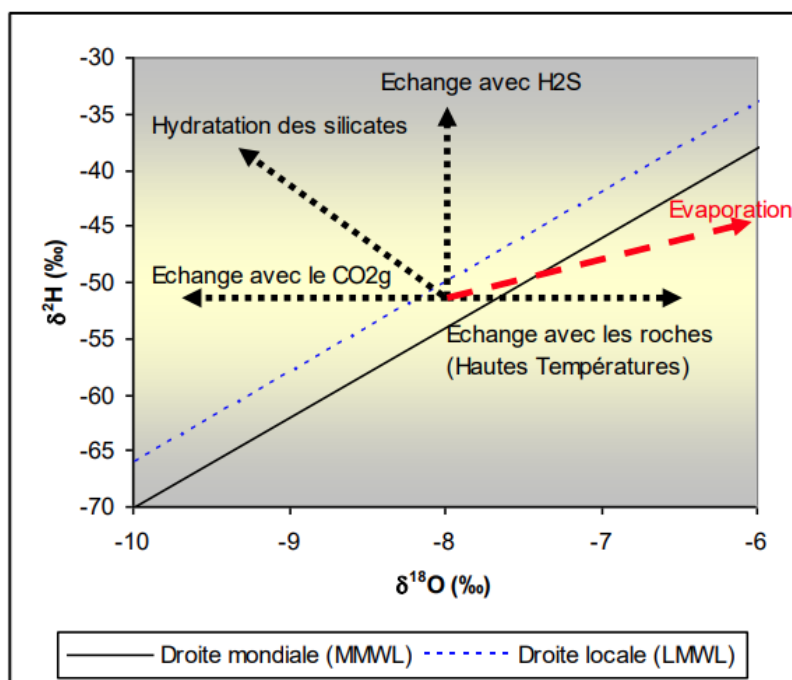


Illustration 52 : Processus d'échanges isotopiques susceptibles d'affecter la signature isotopique de l'eau (^{18}O , ^2H) (d'après Clark et Fritz, 1997).

f) Instrumentation pour le suivi en continu des paramètres physico-chimiques de points d'eau représentatifs

Le budget de l'étude comprenait l'achat de trois sondes de suivi. Trois sondes supplémentaires ont pu être utilisées pour compléter le dispositif de suivi.

Un forage et trois sources ont respectivement été instrumentées en décembre 2019 et janvier 2020 par des sondes CTD-DIVER (Van Essen Instruments) qui permettent le suivi du niveau d'eau, de sa température et sa conductivité électrique (localisation sur l'illustration 53 et photographies à l'illustration 54) :

- le piézomètre du forage du stade implanté dans les formations carbonatées du Jurassique au-dessus du village (utilisé par la commune pour son alimentation en eau potable) ;
- la source du Clos située sous la place de l'Abbé Aloïsi, dans le village. Elle sourd au sein du Keuper ;
- la source du Lavoir située rue Jean Jaurès qui sourd également dans le Keuper ;
- la source de la Haute-Platrière située au lieu-dit Eponyme, également dans le Keuper.

Ces sondes ont été associées à trois sondes BARO-DIVER qui mesurent la pression atmosphérique. La première a été installée au forage du stade, la seconde à proximité de la source du Clos et la troisième de la source de la Haute-Platrière. Ces sondes permettent de faire la mesure de la compensation barométrique à appliquer sur les données de niveau d'eau mesurées par les CTD-DIVER.





Illustration 53 : Photographies de l'équipement du piézomètre situé à côté du forage du stade (1 et 2), de la source de la Haute-Platrière (3 et 4), de la source du Clos (5 et 6) et de la source du Lavoir (7 et 8).

En complément, un forage supplémentaire découvert sur le terrain en mars 2020 a été instrumenté en juin 2020. Il s'agit du piézomètre « FPey » situé dans le Keuper, au-dessus de l'effondrement du Peyrui (Illustration 54).

Ce piézomètre et celui du stade ont fait l'objet d'un nivellement au GPS différentiel afin de pouvoir traduire les mesures de profondeur du niveau de la nappe qu'il capte en un niveau piézométrique exprimé en altitude (m NGF).



Illustration 54 : Photographie de l'instrumentation du piézomètre "FPey".

Enfin, une dernière source identifiée fin 2021 a pu être instrumentée en décembre 2021 pour un suivi restreint de quelques mois. Il s'agit de la source du Vallon de Notre-Dame située en contrebas du lieu-dit de Ste-Bibiane (Illustration 55). Tout comme les autres sources suivies, elle sourd au sein du Keuper.



Illustration 55 : Photographies de la source du Vallon de Notre-Dame.

L'ensemble des sondes installées a fait l'objet d'une maintenance à chaque visite sur le terrain du BRGM pour récupérer les données, nettoyer les capteurs, corriger les éventuelles dérives dans les mesures et sécuriser les dispositifs en cas de problème (cordelettes de fixation détériorées par corrosion, sonde hors d'eau en période d'étiage, etc.).

3.3.4. Contexte hydrogéologique à l'échelle régionale

Pour comprendre le contexte hydrogéologique de Bargemon, il est nécessaire, dans un premier temps, de décrire le contexte hydrogéologique de sa micro-région, de la Dracénie aux abords du Verdon (carte de synthèse à l'illustration 56). La description qui suit a notamment été tirée de l'étude hydrogéologique du nord-est varois (Arvois *et al.*, 1969).

Les formations carbonatées jurassiques du Plan de Canjuers qui surmontent Bargemon sont karstiques. La morphologie de surface de ces terrains est typique d'un modelé karstique avec la présence notamment d'avens en grand nombre, de dolines et de multiples formes de dissolution. Les précipitations qui s'infiltreront au contact de ces terrains se dirigent vers les résurgences karstiques de Fontaine-L'Evêque à l'ouest (bassin versant du Verdon) et de la Siagnole à l'est (bassin versant de la Siagne), comme le montrent les traçages réalisés dans ces secteurs (Illustration 56). Cette organisation des écoulements souterrains n'exclut pas une connexion hydraulique entre ces formations jurassiques situées au nord du Col du Bel Homme et les terrains triasiques sous-jacents de Bargemon, mais elle est susceptible d'être mineure.

Au sein du Trias se distinguent les formations du Keuper et les formations du Muschelkalk, qui sont antérieures.

La formation du Keuper, qui est sous-jacente au Jurassique, et qui surmonte le Muschelkalk, est constituée d'un mélange d'argiles, de gypse et de dolomie en bancs plus ou moins cargneulisée, présentant une structure complexe. A dominante marneuse, cette formation constitue, par rapport à la série calcaro-dolomitique du Lias et du Jurassique, un ensemble imperméable. Il existe cependant de nombreuses sources liées à des niveaux de cargneules ou de dolomies et toujours assez chargées en sulfates. Certaines émergences situées topographiquement sous le contact avec le Lias, et assez rapprochées de ce contact, peuvent drainer le Lias par l'intermédiaire de lentilles de dolomies ou de cargneules ou de formations de pente toujours développées sous la corniche jurassique.

L'ensemble des formations carbonatées du Muschelkalk, constitué de dolomies, cargneules et calcaires, est jugé perméable par fissures. Les niveaux de marnes introduisent localement un compartimentage hydraulique de la formation. C'est la base de la série (dolomies, calcaires inférieurs et cargneules largement développées) qui constitue l'aquifère. L'ensemble forme un réservoir aquifère très important dont le drainage s'effectue vers une série d'émergences situées aux points bas du contact Muschelkalk – Trias inférieur. Le Muschelkalk présente peu d'indices superficiels de phénomènes karstiques.

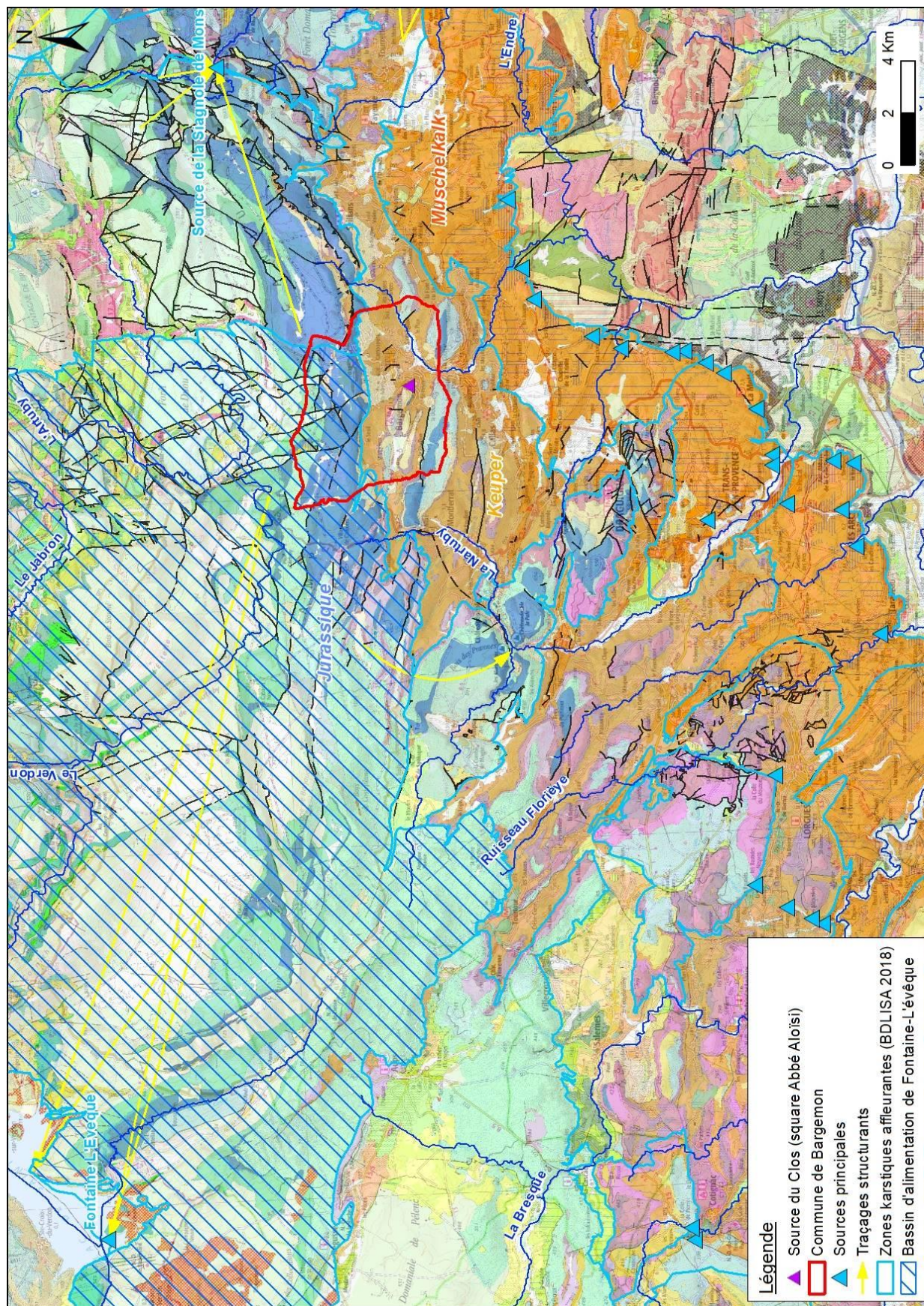


Illustration 56 : Carte du contexte hydrogéologique régional.

3.3.5. Résultats et interprétations des investigations

a) Inventaire des sources et des écoulements d'eau

Le village de Bargemon se caractérise par la présence de nombreuses sources qui alimentent un réseau dense de canaux qui circulent le long des routes du centre-bourg puis descendent vers les jardins en périphérie, ou dans des conduites ou petits canaux enterrés. L'eau des canaux est utilisée depuis toujours pour l'irrigation des jardins.

L'enquête menée a permis de recenser treize sources sur la commune qui sont localisées sur l'illustration 57. Elles sont indépendantes les unes des autres et constituent donc les exhaures naturelles des écoulements souterrains des aquifères.

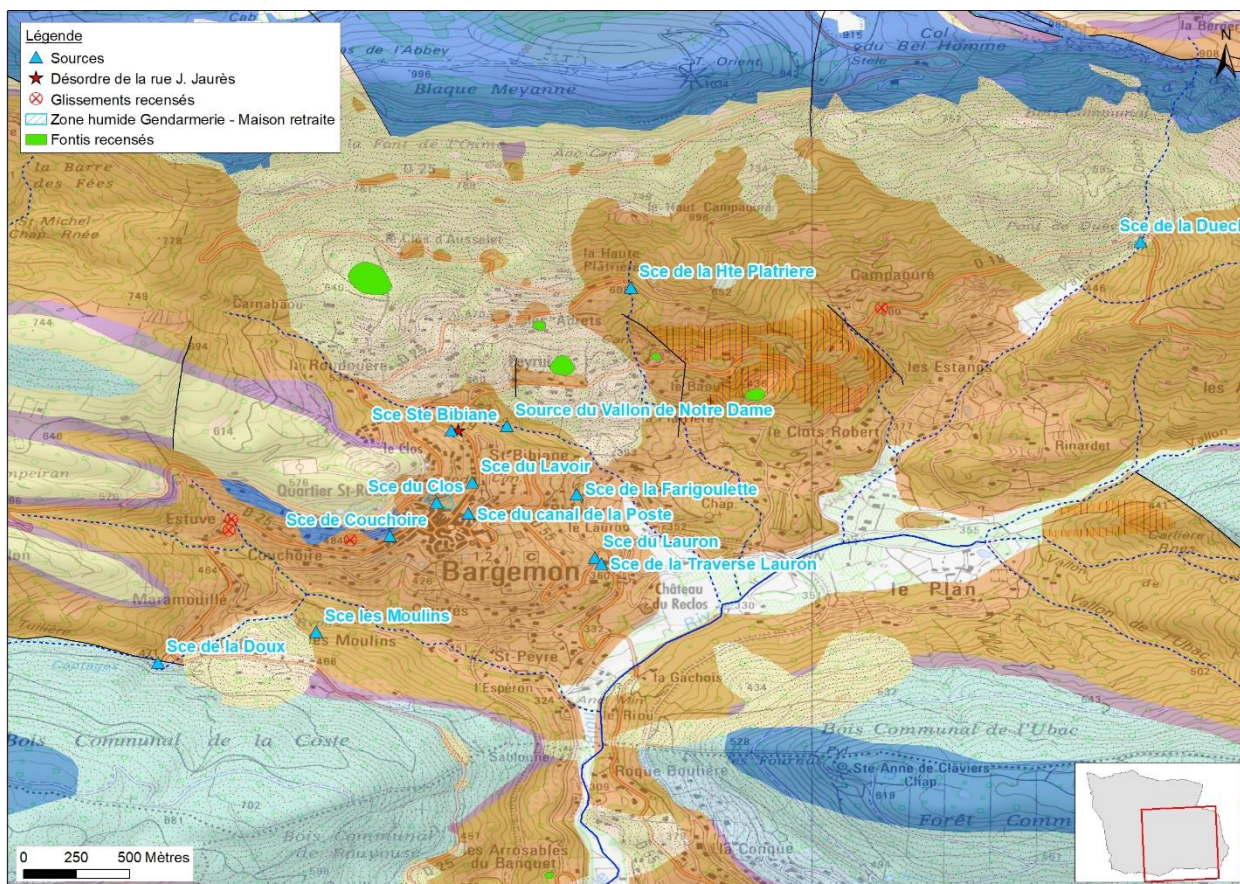


Illustration 57 : Localisation des sources recensées sur la commune de Bargemon sur fond de carte géologique harmonisée au 1/50 000 (@BRGM) et de carte topographique au 1/25 000 (@IGN).

Le traçage réalisé à partir de la source du Clos en février 2022 a permis d'identifier avec certitude les fontaines et écoulements aériens qu'elle alimente sur le centre-bourg et de confirmer son indépendance vis-à-vis de la source du Lavoir. Le schéma d'alimentation est présenté sur l'illustration 58 ci-après.

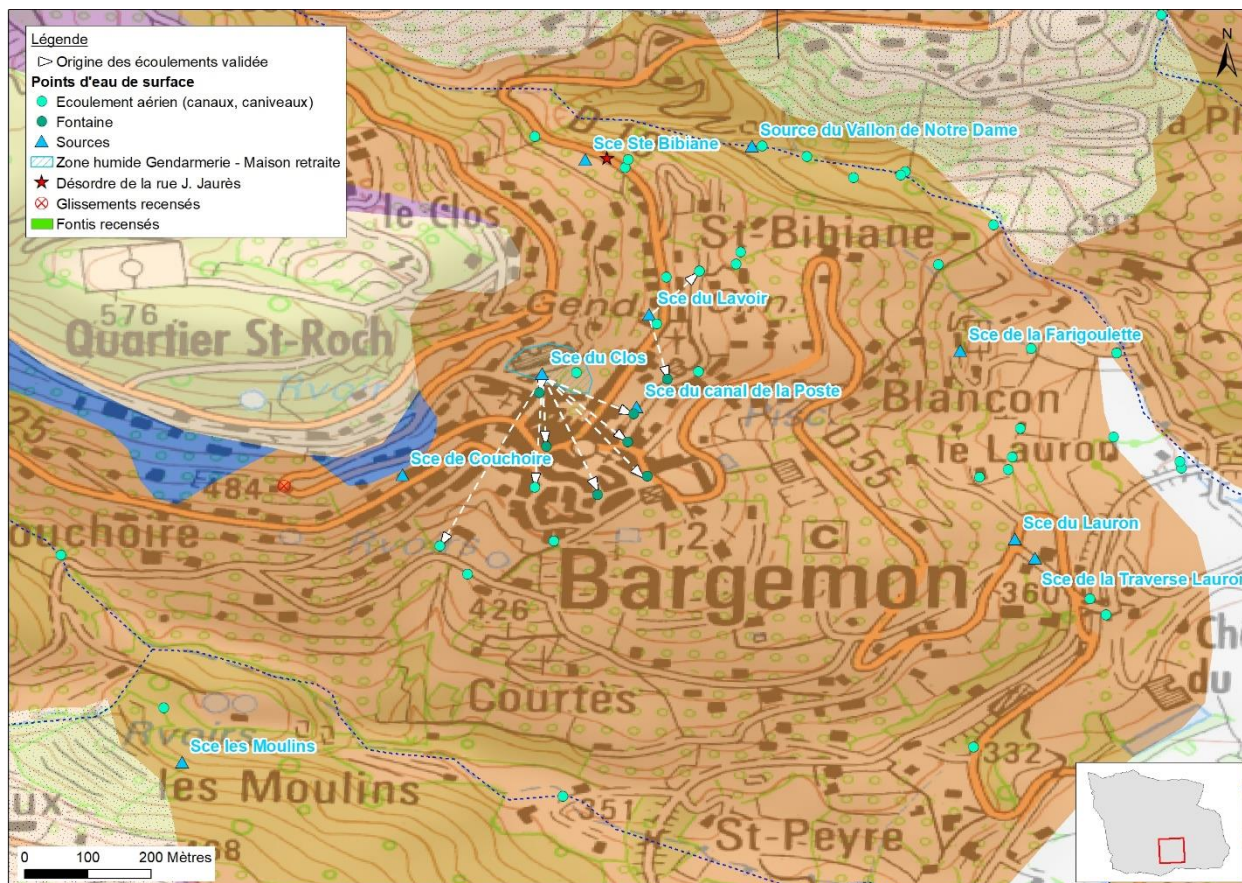


Illustration 58 : Origine des fontaines et des écoulements aériens du centre-bourg.

Les sources recensées sur la commune sont situées entre 400 et 600 m d'altitude. La majorité d'entre elles sont pérennes exceptées la source les Moulins et la source de la Haute Platrière.

Exceptées la source du Lauro et la source du Lavoir dont les configurations permettent des mesures de débit (par mesure du temps de remplissage d'un seau gradué), les autres émergences ne le permettent pas. Les valeurs de débit présentées dans le tableau ci-après (Illustration 59) sont donc à considérer avec circonspection car il s'agit d'estimations visuelles. Elles fournissent néanmoins une information sur la gamme des débits rencontrés lors des différentes campagnes de mesure éclairant ainsi leur mode de fonctionnement hydrogéologique.

Nom de la source	Altitude de l'émergence (m NGF)	Estimation débit (l/s)
Source de la Doux	478	Exploitée. De l'ordre de 10 à plusieurs dizaines l/s
Source les Moulins	401	0 à 2
Source de Couchoire	467	0.5 à 1
Source du Clos	486	1 à 2
Source du canal de la Poste	461	0.25 à 1
Source du Lavoir	474	2 à 6
Source de Ste Bibiane	477	0.1 à 0.25
Source du Vallon de Notre-Dame	428	0.25 à 2 ?
Source de la Farigoulette	383	0.25 à ?
Source du Lauron	379	1.5 à 8
Source de la Traverse du Lauron	373	0.25 à ?
Source de la Haute Patrière	601	0 à 0.5
Source de la Duech	511	0.5 à 15

Illustration 59 : Altitude et estimation des débits des treize sources recensées sur la zone étudiée.

La plupart des sources présente un débit de l'ordre de quelques litres par seconde avec une variabilité saisonnière peu marquée. C'est le cas des sources du centre-bourg (la source du Clos, du Lavoir, du canal de la Poste, de Couchoire). Elles constituent donc les exutoires d'aquifères au comportement inertiel qui bénéficient peu d'apports liés à une infiltration rapide des précipitations. Ces caractéristiques traduisent un milieu aquifère de type fissuré peu ou pas karstifié. La source Ste Bibiane présente un débit plus faible mais également pérenne. Elle est issue du même type d'aquifère.

La source du Lauron, située en contrebas du village et constituant le point d'émergence le plus bas sur la zone étudiée, se démarque des sources du centre-bourg par la variabilité de son débit. Celui-ci se maintient relativement élevé en période de basses eaux (au moins 1.5 l/s d'après les relevés pendant l'étude) et peut augmenter de façon importante en période de hautes eaux (environ 8 l/s mesurés en janvier 2020). Ce comportement réactif face aux précipitations indique que la source bénéficie d'apports liés à une infiltration rapide. Cette dualité traduit un bassin d'alimentation constitué d'une part par un milieu fissuré qui assure un soutien d'étiage efficace (comparable à celui des sources du centre-bourg), et d'autre part par un milieu de type karstique dont la porosité est plus importante (fissures élargies par la dissolution des carbonates). C'est potentiellement également le cas de la source de la Duech.

La source de la Doux constitue l'émergence majeure de la commune, bien que son débit total n'ait pu être observé et mesuré (source exploitée pour l'alimentation en eau potable). Elle traduit un aquifère de type karstique avec des réserves importantes.

La source de la Haute Patrière présente un débit faible qui peut tarir en période d'étiage ce qui traduit un aquifère de faible capacité et non karstifié.

Enfin, la variabilité du débit de la source du vallon de Notre Dame, de la Farigoulette et de celle de la Traverse du Lauron (Illustration 60) est incertaine, celles-ci ayant été identifiées tardivement au cours de l'étude.



Illustration 60 : Photographie de la source de la Traverse du Lauron par rapport à l'emplacement de la source du Lauron.

Concernant les rivières présentes sur la commune, tous les écoulements ne sont pas pérennes. Le ruisseau du Duech est pérenne à partir de la source (et temporaire en amont). Les vallons de Malignon et de l'Ubac qui rejoignent la plaine du Riou à l'est sont temporaires. Le ruisseau qui est alimenté par la source du vallon de Notre Dame est pérenne à partir de la source et temporaire en amont. Il rejoint le Riou dans la plaine, à proximité du Château du Reclos. Le Riou, malgré l'alimentation par deux ruisseaux pérennes, ne présente pas d'écoulements aériens pérennes. L'alimentation provenant des deux ruisseaux s'infiltre en effet dans les alluvions de la plaine. La rivière retrouve un écoulement aérien pérenne plus en aval, grâce à sa confluence avec le ruisseau de la Doux qui est alimenté par la source du même nom. Les écoulements issus des sources du village et conduits par canaux vers les jardins situés sous le village sont principalement drainés par le ruisseau de la Doux et le vallon de Notre Dame.

b) Apport des analyses chimiques pour discriminer les eaux impactées par la dissolution du gypse

- Qualification des analyses à partir de la balance ionique

Le calcul de la balance ionique correspond à la somme des cations et des anions, et permet de vérifier l'électro-neutralité de la solution analysée. Elle s'exprime en pourcentage. Le critère de qualité correspond à une balance ionique de $\pm 5 \%$ et le critère de rejet de $\pm 10 \%$. Un signe « + »

(positif) de la balance signifie que les espèces positives (cations) sont plus abondantes que les espèces négatives (anions) ; ceci peut résulter d'un défaut de caractérisation des anions (pas assez d'espèces recherchées), mais reflète souvent l'incertitude analytique attachée aux mesures de laboratoire.

Les balances ioniques calculées sur l'ensemble des analyses chimiques réalisées sur les campagnes de hautes et basses eaux sont très satisfaisantes excepté pour le prélèvement réalisé sur la source les Moulins qui est de -10.4 % (Illustration 61). Etant à la limite du critère de rejet, cette analyse est cependant conservée.

Nom du point de prélèvement	Type de point d'eau	Date prélèvement	Balance ionique
Sce du Clos	Source	26/06/2019	-1,5%
Sce Lavoir	Source	26/06/2019	-1,3%
Cave Virginie	Ecoulement urbain	26/06/2019	-1,8%
Sce canal Poste	Source	26/06/2019	-2,2%
Sce Couchoire	Source	26/06/2019	-4,7%
Sce de la Doux	Source	26/06/2019	-4,1%
Sce Hte Platrière	Source	26/06/2019	0,8%
Ravin sce estuve	Rivière	26/06/2019	-3,6%
Sce Ste Bibiane	Source	26/06/2019	-2,1%
Sce Lauron	Source	26/06/2019	-2,8%
Rau St Peyre	Rivière	26/06/2019	-2,5%
Rau Duech	Rivière	26/06/2019	-1,7%
Pont SNCF	Ecoulement urbain	26/06/2019	-2,7%
Pont SNCF	Ecoulement urbain	13/12/2019	-2,0%
Sce canal Poste	Source	13/12/2019	-1,8%
Forage du stade	Forage	13/12/2019	1,2%
Rau Duech	Rivière	13/12/2019	3,5%
Sce du Clos	Source	13/12/2019	0,9%
Sce Ste Bibiane	Source	13/12/2019	1,8%
Sce Couchoire	Source	13/12/2019	1,5%
Sce Lauron	Source	13/12/2019	0,3%
Sce Lavoir	Source	13/12/2019	0,0%
Estuve blanc	Rivière	15/01/2020	1,1%
Hte platrière route	Source	15/01/2020	-1,8%
Ravin sce estuve	Rivière	15/01/2020	6,2%
Rau St Peyre	Rivière	15/01/2020	2,3%
Sce les Moulins	Source	15/01/2020	-10,4%
Sce de la Doux	Source	15/01/2020	1,9%
Sce du Lavoir	Source	15/01/2020	-0,5%
Sce Hte Platrière	Source	15/01/2020	-1,1%
Sce du Clos	Source	15/01/2020	-1,0%

Illustration 61 : Balances ioniques des analyses réalisées sur les campagnes de prélèvement de basses et hautes eaux.

- Caractérisation des faciès chimiques des eaux

L'analyse des éléments chimiques majeurs (hydrogénocarbonates, carbonates, chlorures, sulfates, nitrates, calcium, magnésium, sodium, potassium) permet de caractériser les faciès chimiques des eaux et de pouvoir discriminer leur origine.

Deux modes de représentation complémentaires de ces faciès sont proposés ici : le diagramme de Piper et le diagramme de Schöeller Berkloff. Ils permettent d'identifier les ions majeurs sur chaque prélèvement d'eau.

L'ensemble des analyses a été projeté dans le diagramme de Piper ci-après (Illustration 62) afin de présenter le panel des faciès en présence. Ainsi, ce sont les anions qui discriminent les faciès des eaux rencontrées sur Bargemon. Les cations sont majoritairement représentés par le calcium et de façon secondaire pour le magnésium, tandis que les anions majoritaires sont les sulfates et/ou les bicarbonates.

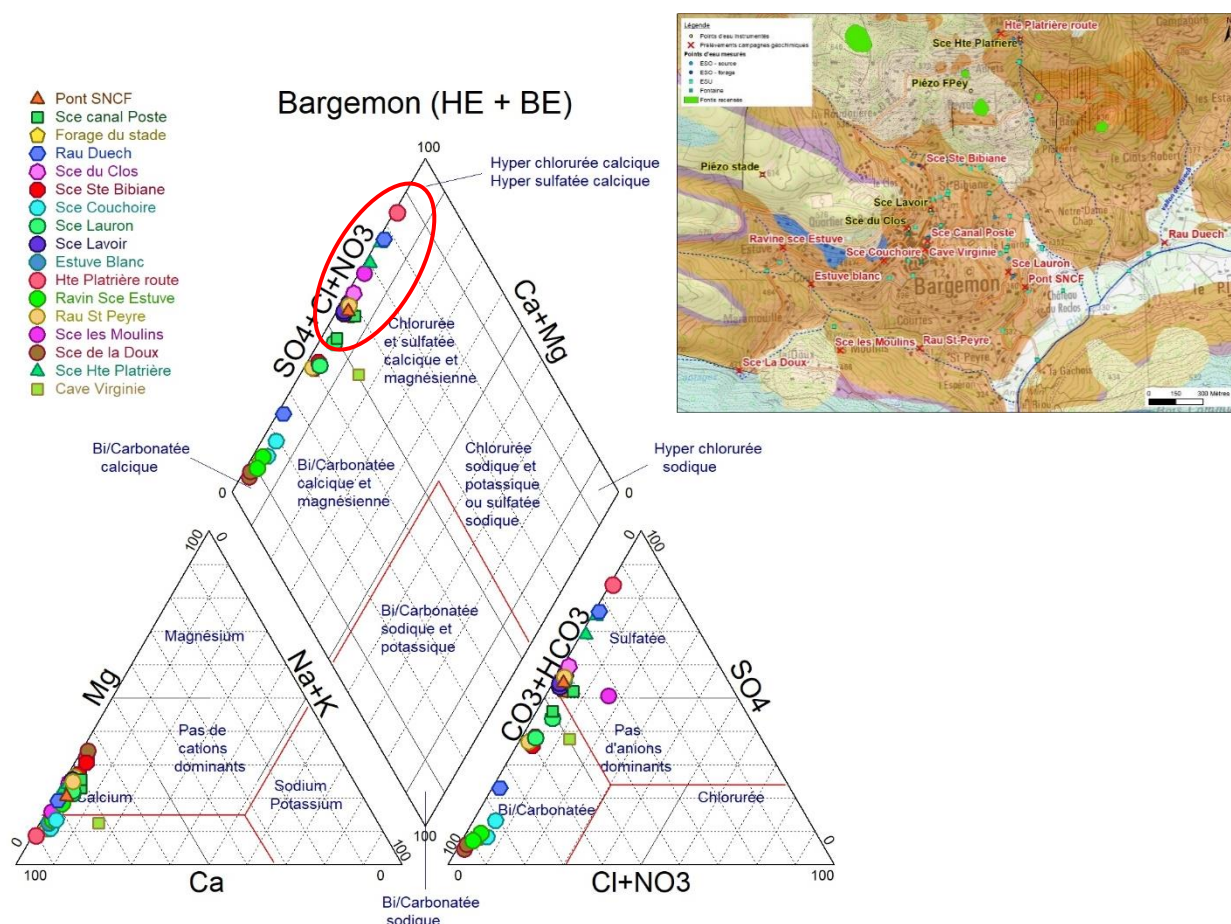


Illustration 62 : Diagramme de Piper de l'ensemble des analyses chimiques de hautes et basses eaux.

Ainsi, les faciès suivants sont observés :

- **bicarbonaté calcique** pour la source de la Doux, la source Couchoire, le forage du stade et le ravin de la source Estuve que ce soit en période de hautes ou basses eaux. Le ruisseau du Duech présente également ce faciès en période de hautes eaux (), tandis qu'il avait un faciès sulfaté sur le prélèvement de basses eaux. Ce faciès indique une origine de ces écoulements dans les formations carbonatées du Jurassique, en cohérence avec leur emplacement au contact Jurassique/Keuper. Le ruisseau de St Peyre, la source du Lauron et la source Ste Bibiane présente également un faciès bicarbonaté calcique, mais sont sensiblement plus enrichis en sulfates que les points précédemment cités ;
- **sulfaté calcique** pour la source de la Haute Platrière et l'émergence sur la route dans ce même secteur, la source du Clos, la source les Moulins, la source du Lavoir, le pont SNCF, le ruisseau du Duech en basses eaux et la source du canal de la Poste (points cerclés de rouge

sur le diagramme). Ce faciès marque une **influence marquée du gypse** présent dans le Keuper sur la minéralisation de l'eau. Les teneurs en sulfates observées sur ces points sont supérieures à 100 mg/l (soient 2 méq/l) ;

- le point d'eau de la « Cave Virginie », qui est un écoulement se faisant dans un petit canal souterrain passant par des caves, dans le centre-bourg, présente un faciès intermédiaire aux deux précédents avec notamment des concentrations en sodium et en potassium supérieures aux autres points. Ce point se détache totalement des autres et l'origine géologique de cet écoulement est difficilement interprétable.

Les diagrammes de Schöeller Berkloff qui suivent, réalisés par campagne, permettent de mieux discerner l'évolution des faciès suivant les conditions hydriques de chaque campagne.

Ainsi, seul le point du ruisseau du Duech présente une variation notable de son faciès entre le prélèvement réalisé en basses eaux (faciès marquant l'influence du gypse, Illustration 63) et celui en hautes eaux (peu marqué par les sulfates, Illustration 64). Cette variation montre une forte contribution d'eau issue des carbonates du Jurassique en période de hautes eaux aux écoulements du Duech. Ces observations sont cohérentes avec le fait qu'il prend sa source au pied de la crête du Col du Belhomme constituée du Jurassique (Illustration 65). En période de basses eaux, le Jurassique ne contribue plus ou peu aux écoulements de la rivière au profit du Keuper.

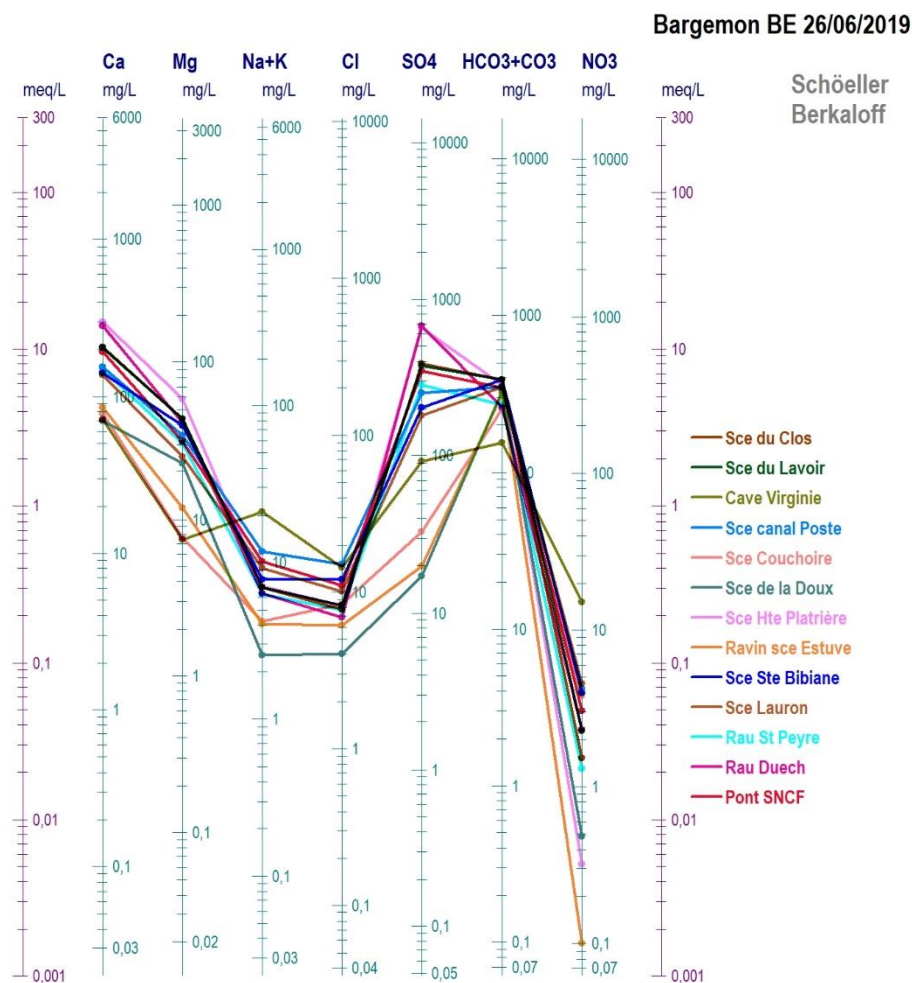


Illustration 63 : Diagramme de Schöeller Berkloff des analyses de basses eaux (juin 2019).

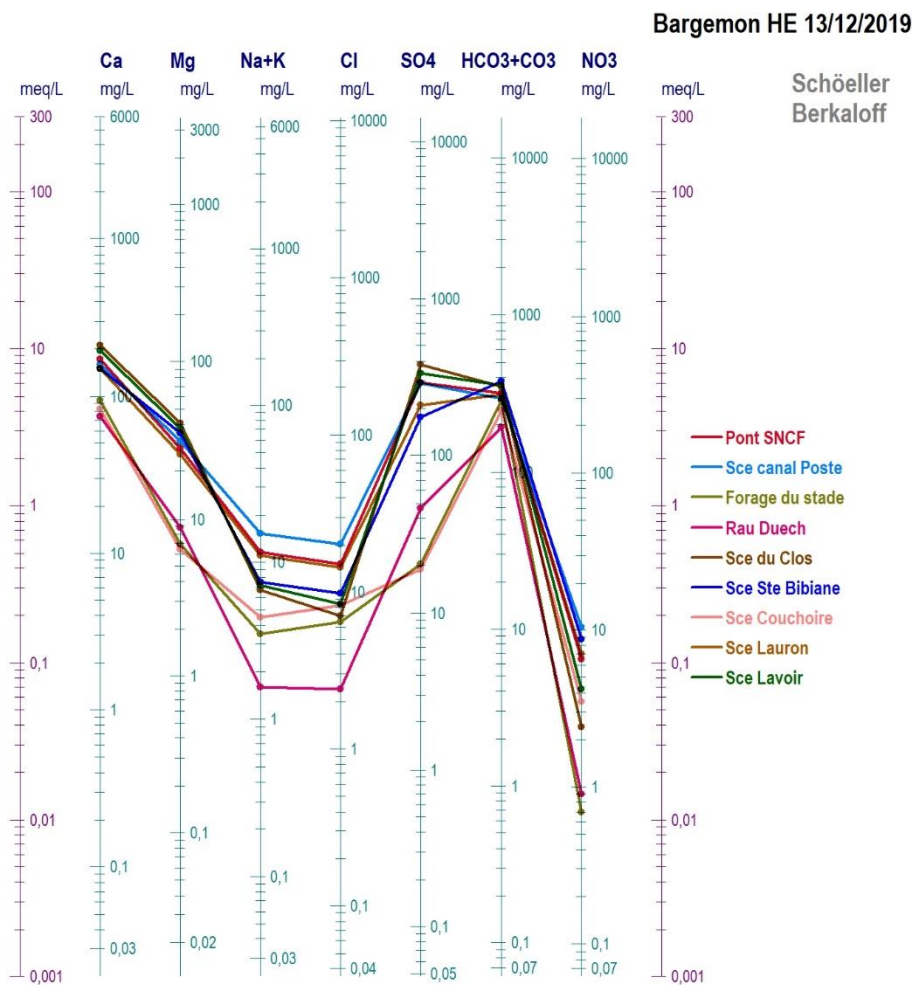


Illustration 64 : Diagramme de Schöeller Berkaloff des analyses de hautes eaux (décembre 2019).

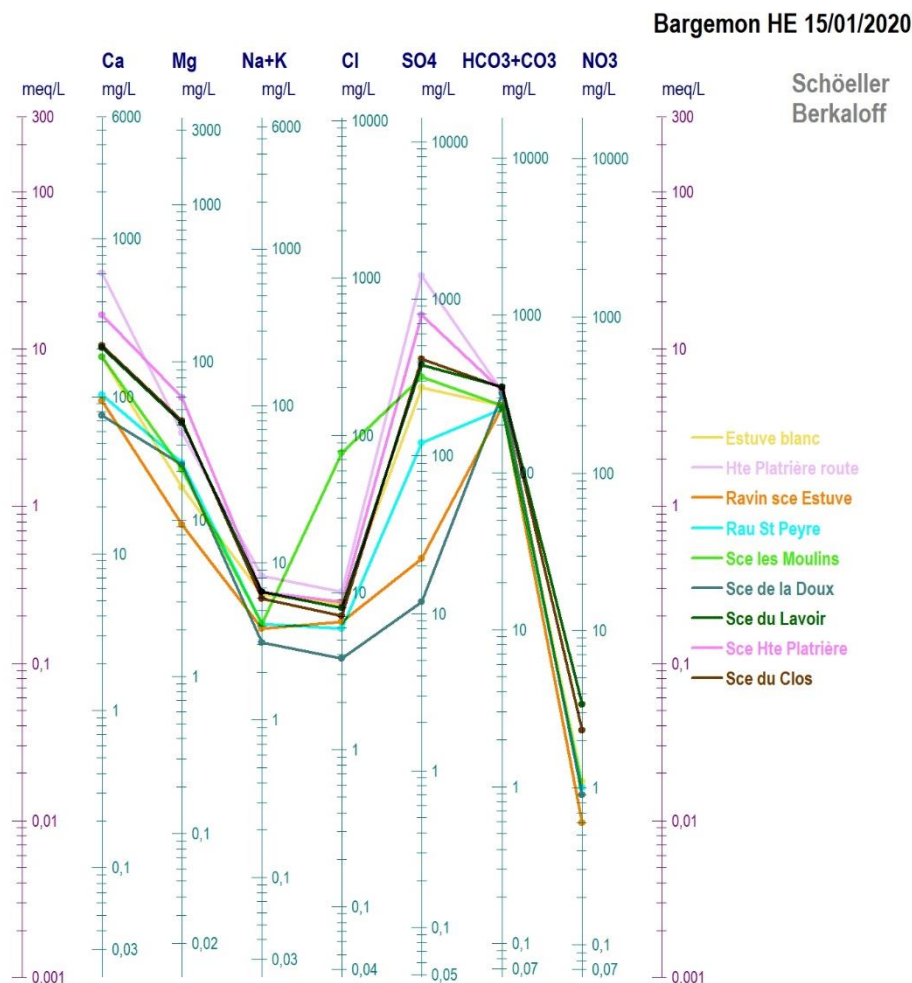


Illustration 65 : Diagramme de Schöeller Berkaloff des analyses de hautes eaux (janvier 2020).

- Enseignement des diagrammes binaires sur les interactions eau-roche

Plusieurs digrammes binaires ont été réalisés à partir des résultats des analyses chimiques menées sur les différents points d'eau permettant de mettre en évidence les interactions eau-roche de ces écoulements (Illustration 66).

Le graphique de la conductivité électrique en fonction de la teneur en sulfates montre que ces deux paramètres présentent une relation linéaire (coefficient de détermination de 0,96). Cela montre que **l'augmentation de la minéralisation de l'eau est directement liée à la dissolution du gypse et que la conductivité électrique peut être utilisée comme paramètre indirect d'évaluation du degré d'interaction de l'eau avec le gypse.**

Le graphique de la concentration en calcium en fonction de la concentration en sulfates montre que la source de la Haute Patrière, l'émersion « Haute Patrière route » et le ruisseau du Duech en basses eaux sont sur la droite de dissolution de l'anhydrite (CaSO_4). Cela témoigne d'un **processus actif de dissolution du gypse sur ces points d'eau**. La source de la Doux, la source Couchoire, le ravin source Estuve, le ruisseau de St Peyre en hautes eaux et le ruisseau du Duech en hautes eaux sont clairement écartés de la droite et marquent un excès de calcite. Entre ces deux pôles, des points d'eau présentent une situation intermédiaire où ils présentent un léger excès de calcite mais sont situés proche de la droite. Il s'agit des sources Ste Bibiane, du Lavoir,

du Clos, du canal de la Poste, du Lauron, les Moulins, du ruisseau de l'Estuve Blanc et du Pont SNCF. Sur ces points, un phénomène de dissolution du gypse existe donc, mais dans de faibles proportions.

Le graphique des chlorures en fonction de la somme du sodium et du potassium montre que l'ensemble des points est aligné sur la droite de dissolution de la halite (NaCl), exceptée la source les Moulins (probable erreur analytique sur les chlorures). Les concentrations sont cependant faibles et correspondent au pôle carbonaté. Il n'est ici pas mis en évidence de phénomène de dissolution active de halite.

Le diagramme de la calcite en fonction des bicarbonates montre que certains points sont alignés sur la droite de dissolution de la calcite (CaCO_3) et que d'autres s'en écartent. Les points alignés correspondent à la source de la Doux, la source Couchoire, le ruisseau du Duech en hautes eaux, le ravin source Estuve et le ruisseau de St Peyre en hautes eaux. Ces résultats montrent que ces eaux dissolvent activement la calcite et sont cohérents avec le faciès chimique de ces eaux et leur origine dans les carbonates du Jurassique. La quasi constance de la teneur en bicarbonates des points qui s'écartent de la droite de dissolution montre que ces échantillons ont vraisemblablement atteint la saturation en calcite.

Le graphique du calcium en fonction du magnésium montre que les points échantillonnés s'alignent globalement sur une droite parallèle à la droite de dissolution de la dolomie (Ca, MgCO_3). L'excès en calcium de la majorité des points s'expliquent par la dissolution de la calcite majoritaire par rapport à la dolomie. Les teneurs en calcium et en magnésium les moins élevées concernent les points d'eau issus des carbonates du Jurassique. Les autres points présentent donc une interaction sensiblement plus forte avec la dolomie, en cohérence avec sa présence en bancs au sein de la formation du Keuper.

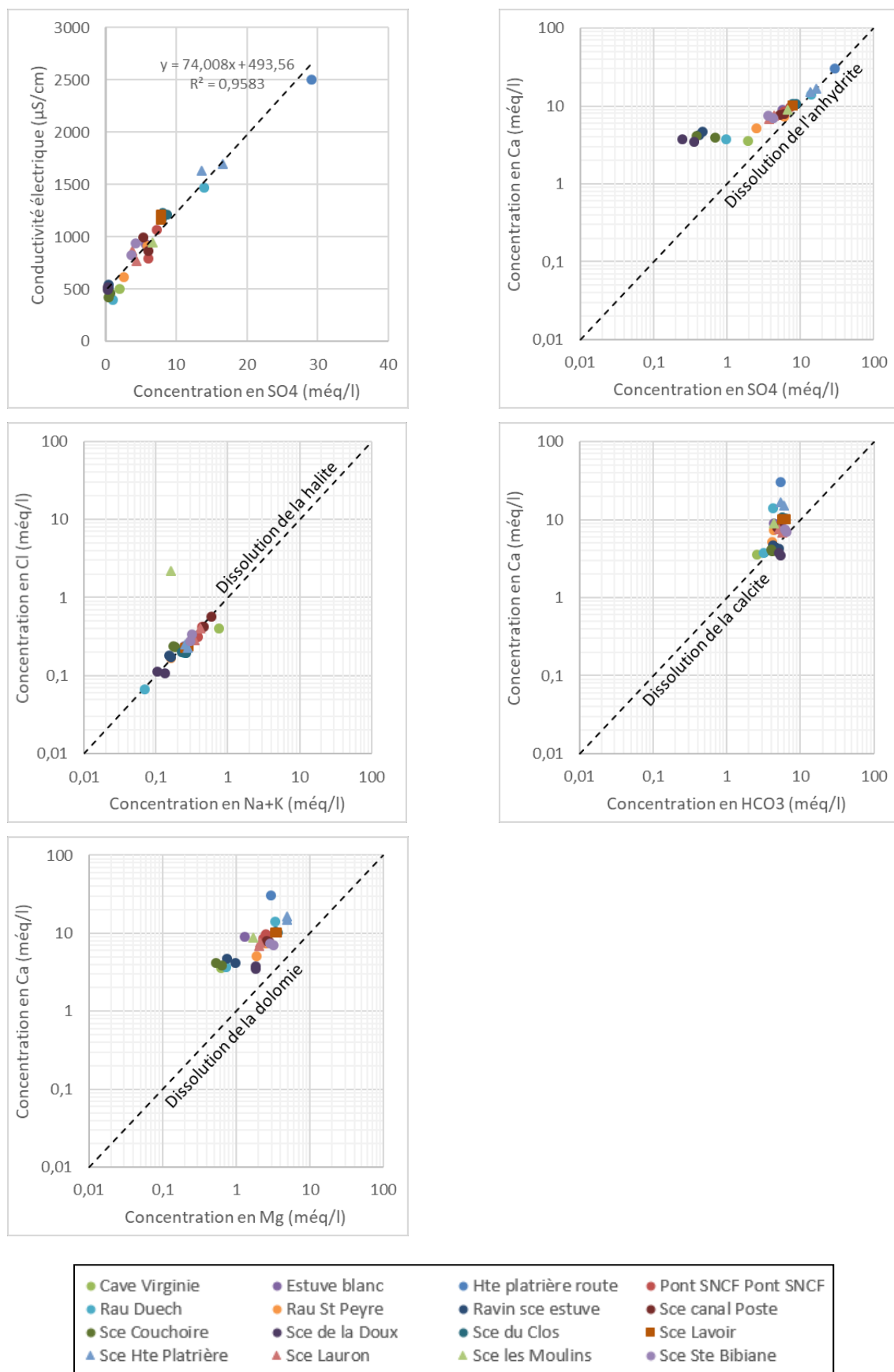


Illustration 66 : Diagrammes binaires sur les résultats des campagnes hautes et basses eaux.

En complément, il a été mené une comparaison de la chimie des eaux de Bargemon à celle de sources et forages de la région pour placer les échantillons de Bargemon dans le contexte géochimique régional. Cinq sources et cinq forages ont été utilisés répartis sur les communes de Les Arcs, Vidauban, Le Thoronet, Trans-en-Provence, Taradeau et Le Cannet-des-Maures (Illustration 67).

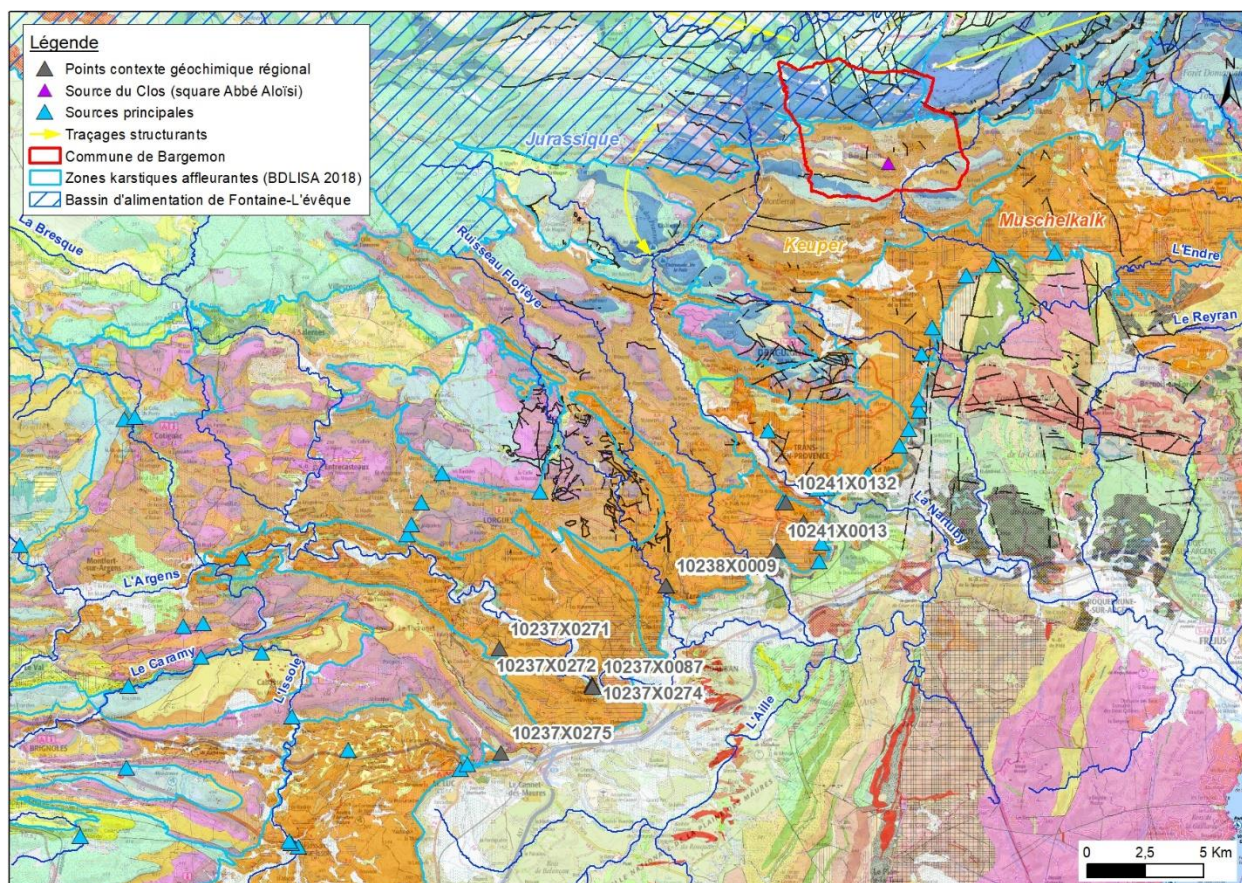


Illustration 67 : Localisation des sources et forages dont les analyses chimiques ont été utilisées pour une comparaison avec les prélèvements sur Bargemon.

Les analyses chimiques disponibles sur ces points d'eau ont été extraites d'ADES¹⁸.

Le diagramme de la concentration en calcium en fonction de celle en sulfates des prélèvements réalisés en basses eaux sur Bargemon et des 10 points d'eau régionaux permet de distinguer les quatre grands pôles chimiques existants sur la région (Illustration 68) :

- les eaux dont la chimie est influencée par les calcaires du Jurassique et qui correspondent aux sources de la Doux et de Couchoire et au ruisseau source Estuve ;
- les eaux issues des calcaires et dolomies du Muschelkalk dont la chimie de la source du Lauron se rapproche ;

¹⁸ Portail national d'Accès aux Données sur les Eaux Souterraines (quantitatives et qualitatives) : <https://ades.eaufrance.fr/>

- les eaux marquées par une influence du gypse présent dans le Keuper. C'est le cas pour les sources du canal de la Poste, du Clos (Abbé Aloïsi), du Lavoir, du ruisseau de St Peyre et du Pont SNCF. La source Ste Bibiane se situe à l'intermédiaire entre ce pôle et le précédent ;
- les eaux présentant une signature proche de l'équilibre avec le gypse du Keuper. Ce pôle ne concerne que la source de la Haute Platrière et le ruisseau du Duech à l'étiage, mais la source des Moulières (point régional) présente une chimie également fortement influencée par la dissolution du gypse.

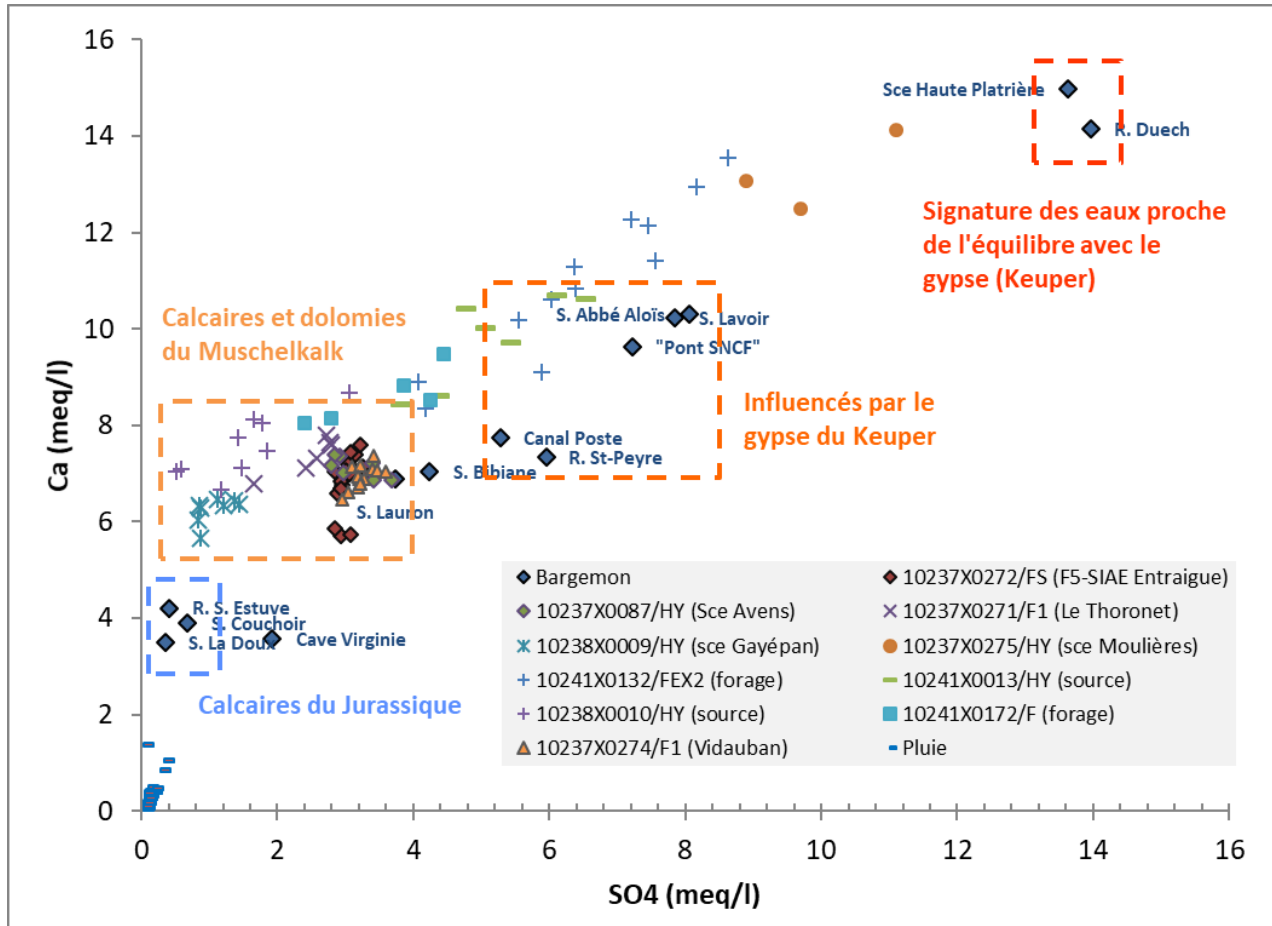


Illustration 68 : Diagramme de la concentration en calcium en fonction de celle en sulfates des prélèvements réalisés en basses eaux sur Bargemon et des 10 points d'eau régionaux.

- Calcul de l'indice de saturation des eaux vis-à-vis des principales phases minérales

Les indices de saturation, qui permettent de déterminer si une eau est ou non à l'équilibre chimique avec une phase minérale, sont reportés dans le tableau page suivante. Ils sont également représentés dans des graphiques à l'illustration 69. Ils ont été calculés grâce au logiciel PhreeQC). Les phases minérales calculées sont celles marquant les interactions de l'eau avec les formations sédimentaires carbonatées (aragonite, calcite, dolomite) et avec les formations évaporitiques (anhydrite, gypse, halite).

Un indice de saturation égal à zéro indique que l'eau est à l'équilibre avec la phase minérale considérée (en pratique, on admet une tolérance autour de la valeur zéro, usuellement $\pm 0,5$). Un indice négatif indique une sous-saturation, la phase minérale pouvant être dissoute. Un indice positif indique une sursaturation, et une précipitation potentielle de la phase minérale. En d'autres

termes, un indice positif signifie que l'eau a circulé au contact de la phase minérale (présente dans l'encaissement rocheux) et la dissoute.

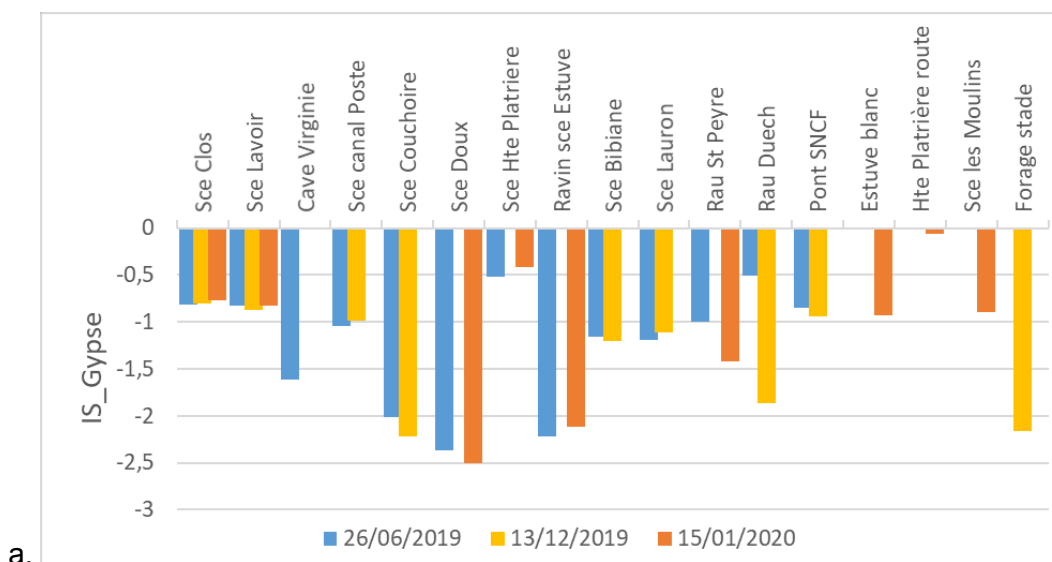
Nom point d'eau	Date	Phases minérales					
		Aragonite CaCO ₃	Calcite CaCO ₃	Dolomie CaMg(CO ₃) ₂	Anhydrite CaSO ₄	Gypse CaSO ₄ ·2H ₂ O	Halite NaCl
Sce Clos	26/06/2019	0,12	0,26	0,19	-1,03	-0,81	-8,99
Sce Lavoir	26/06/2019	0,12	0,26	0,2	-1,04	-0,82	-8,98
Cave Virginie	26/06/2019	-0,58	-0,43	-1,5	-1,83	-1,61	-8,34
Sce canal Poste	26/06/2019	0	0,14	-0,03	-1,26	-1,04	-8,49
Sce Couchoire	26/06/2019	-0,31	-0,16	-0,98	-2,23	-2,01	-9,07
Sce Doux	26/06/2019	-0,25	-0,1	-0,35	-2,59	-2,37	-9,65
Sce Hte Platrière	26/06/2019	0,18	0,33	0,29	-0,74	-0,52	-9
Ravin sce Estuve	26/06/2019	-0,19	-0,05	-0,59	-2,44	-2,22	-9,29
Sce Bibiane	26/06/2019	0,02	0,16	0,11	-1,38	-1,16	-8,72
Sce Lauron	26/06/2019	-0,03	0,12	-0,16	-1,41	-1,19	-8,8
Rau St Peyre	26/06/2019	-0,14	0,01	-0,33	-1,22	-1	-9,04
Rau Duech	26/06/2019	0,02	0,16	-0,18	-0,73	-0,51	-9,12
Pont SNCF	26/06/2019	0,06	0,2	-0,05	-1,07	-0,85	-8,74
Pont SNCF	13/12/2019	-0,01	0,13	-0,18	-1,16	-0,94	-8,54
Sce canal Poste	13/12/2019	-0,07	0,07	-0,22	-1,2	-0,98	-8,25
Forage stade	13/12/2019	-0,19	-0,04	-0,87	-2,38	-2,16	-9,29
Rau Duech	13/12/2019	-0,44	-0,3	-1,17	-2,09	-1,87	-9,98
Sce Clos	13/12/2019	0,09	0,23	0,09	-1,02	-0,8	-9,07
Sce Bibiane	13/12/2019	0,03	0,18	0,07	-1,42	-1,2	-8,83
Sce Couchoire	13/12/2019	-0,29	-0,15	-1,06	-2,44	-2,22	-9,07
Sce Lauron	13/12/2019	-0,05	0,09	-0,23	-1,33	-1,11	-8,58
Sce Lavoir	13/12/2019	0,07	0,21	0,06	-1,09	-0,87	-8,94
Estuve blanc	15/01/2020	-0,05	0,09	-0,53	-1,15	-0,93	-9
Hte Platrière route	15/01/2020	0,33	0,47	0,04	-0,28	-0,06	-8,86
Ravin sce Estuve	15/01/2020	-0,22	-0,08	-0,82	-2,34	-2,12	-9,26
Rau St Peyre	15/01/2020	-0,25	-0,1	-0,51	-1,64	-1,42	-9,31
Sce les Moulins	15/01/2020	-0,08	0,07	-0,46	-1,11	-0,89	-8,22
Sce Doux	15/01/2020	-0,24	-0,09	-0,37	-2,72	-2,5	-9,51
Sce Lavoir	15/01/2020	0,07	0,22	0,08	-1,04	-0,82	-9,01
Sce Hte Platrière	15/01/2020	0,16	0,31	0,2	-0,64	-0,42	-9,02
Sce Clos	15/01/2020	0,07	0,22	0,08	-0,99	-0,77	-9,13

Illustration 69 : Indices de saturation des eaux vis-à-vis des principales phases minérales pour l'ensemble des prélèvements en basses et hautes eaux.

Les données montrent que pour les phases minérales carbonatées (les trois premières colonnes du tableau), la majorité des points d'eau sont à l'équilibre voire sur-saturés. Les sous-saturations concernent la phase carbonatée de la dolomie et correspondent aux points d'eau de la Cave Virginie (point particulier comme démontré précédemment), la source Couchoire, le ravin source Estuve, le forage du stade et le ruisseau du Duech en hautes eaux (le ruisseau d'Estuve blanc et le ruisseau de St Peyre en hautes eaux sont proches de l'équilibre avec respectivement -0,53 et -0,51). Ces résultats montrent que ces points d'eau drainent *a priori* des faciès carbonatés peu dolomités. Il est ainsi intéressant de noter que la source de la Doux a acquis un faciès plus dolomitisé que la source Couchoire. Le contexte géologique des bassins d'alimentation de ces deux sources est *a priori* similaire, mais cet enrichissement sur la source de la Doux résulterait

soit d'un temps de transfert plus long (et donc potentiellement un bassin d'alimentation plus grand), soit d'une présence plus marquée de faciès dolomitiques sur son bassin d'alimentation. Ces deux causes peuvent éventuellement se cumuler.

Les indices de saturation calculés pour les phases minérales évaporitiques montrent en premier lieu que les points d'eau sont largement sous-saturés en halite, ce qui est cohérent avec l'état des connaissances du contexte géologique qui n'en mentionne pas l'existence localement. Quelques points d'eau sont à l'équilibre avec la phase minérale du gypse ou en sont très proches : la source de la Haute Platrière, le ruisseau du Duech à l'étiage et l'émergence de la route à la Haute Platrière. Pour ce dernier point, la phase minérale de l'anhydrite est également à l'équilibre. Ces **résultats signent l'existence de processus de dissolution du gypse sur le bassin d'alimentation de chacun de ces points d'eau**. Il est en outre intéressant de noter que le Ravin de l'Estuve (localisation sur l'illustration 70) sur lequel deux prélèvements ont pu être faits (« Ravin Sce Estuve » en amont et « Estuve blanc » en aval) présente une évolution de l'indice de saturation en gypse de l'amont vers l'aval : il augmente de -2,12 à -0,93 sur la campagne hautes eaux du 15/01/2020 **témoignant d'un apport en SO_4 et Ca dans les eaux par dissolution du gypse**. Cette observation est cohérente avec la zone de glissement connue entre ces deux points de prélèvement, au niveau de la D25, et sur laquelle le gypse a été identifié comme l'un des moteurs au phénomène de glissement¹⁹.



¹⁹ BRGM R 31793 PAC 4S 90-CAIRON / DELLERY

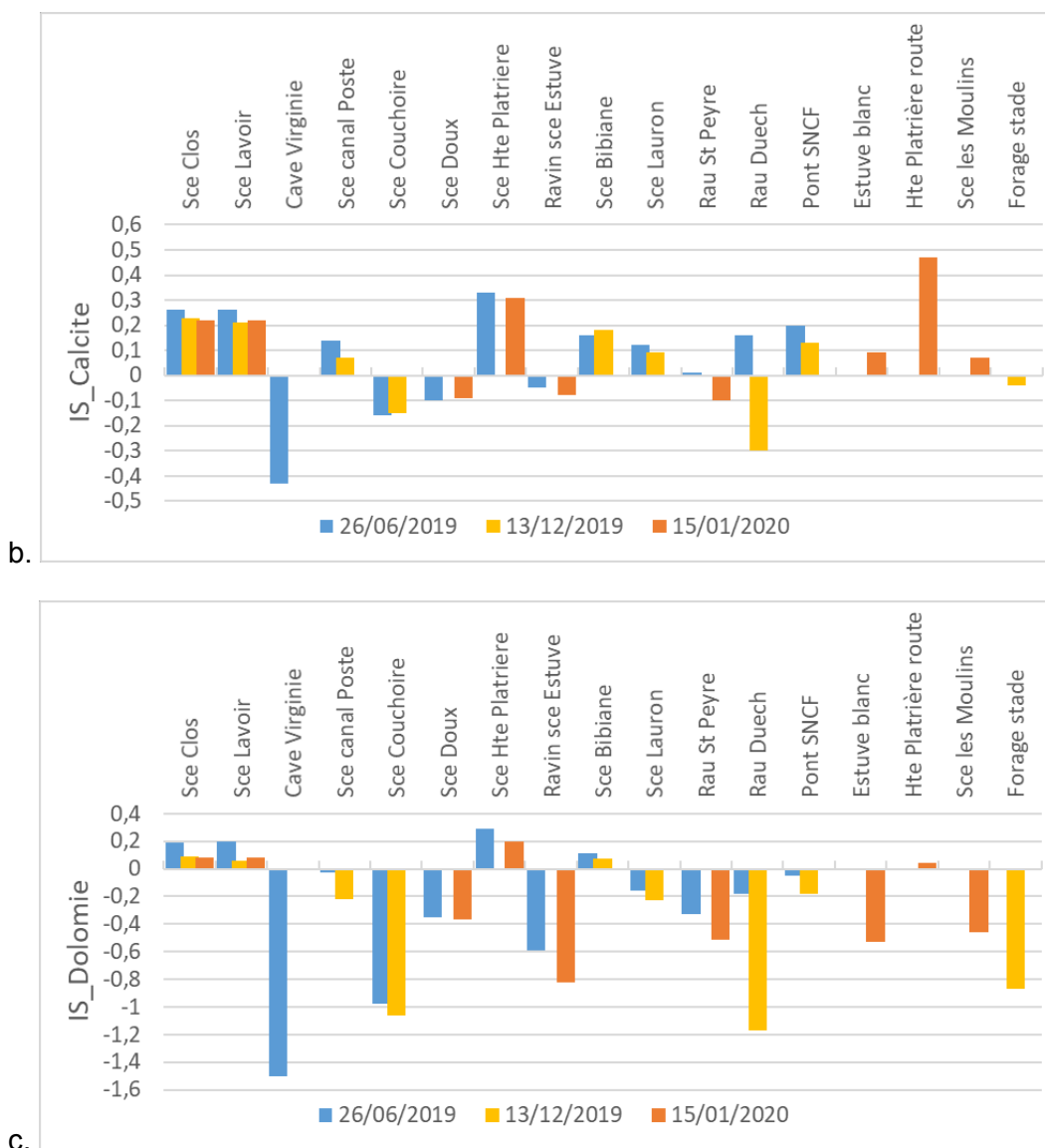


Illustration 70 : Représentation graphique des indices de saturation des phases minérales (a) du gypse, (b) de la calcite, (c) de la dolomie pour l'ensemble des prélèvements d'eau réalisés en basses et hautes eaux.

- Apport des isotopes stables de l'eau pour caractériser les zones de recharge des points d'eau

L'illustration 71 présente les résultats des analyses des isotopes stables de la molécule d'eau sur les prélèvements réalisés lors de la campagne basses eaux de juin 2019.

Excepté un point, l'ensemble des eaux échantillonnées se répartit entre les droites des pluies mondiales (Craig, 1961) et de l'ouest de la Méditerranée (Celle, 2000), ce qui témoigne de l'origine exclusivement météorique des eaux des aquifères et des rivières.

Le point excentré correspond au prélèvement « Cave Virginie ». Il est enrichi en isotopes lourds de l'eau et témoigne d'une histoire différente des autres points qui sont nettement plus appauvris.

L'enrichissement de ce point d'eau et son écart de la droite météorique mondiale indique qu'il a subi des processus d'évaporation ; l'eau prélevée était probablement stagnante.

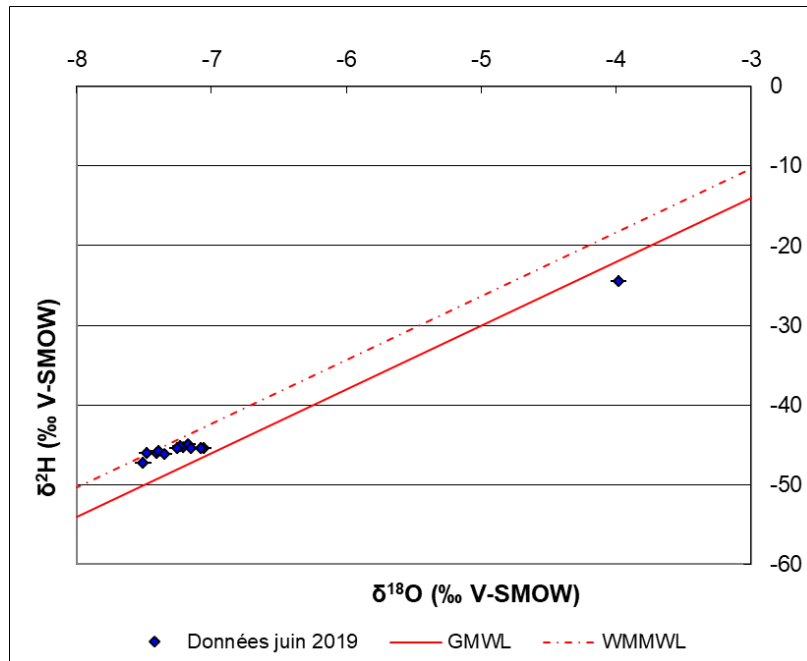


Illustration 71 : Signature isotopique en deutérium en fonction de l'Oxygène 18 pour les eaux prélevées à Bargemon en juin 2019 (basses eaux).

L'illustration 72 présente un zoom qui exclut le point « Cave Virginie ».

Bien que les signatures isotopiques des points d'eau prélevés soient très proches, il est possible de distinguer des variations qui donnent des indications relatives sur l'altitude de l'aire d'alimentation de ces points d'eau (la zone de recharge). En effet, en l'absence de mesure de la signature isotopique des précipitations sur la commune de Bargemon, il n'est pas possible d'estimer l'altitude des aires de recharge des points d'eau prélevés, seule une caractérisation relative des points entre eux peut être faite :

- le point le plus appauvri correspond à la source de la Haute Platrière (-7,51 pour $\delta^{18}\text{O}$ et -47,3 pour $\delta^2\text{H}$), en cohérence avec le fait qu'il soit situé à l'altitude la plus haute ; son bassin d'alimentation draine donc une aire d'altitude plus élevée que les autres points (susceptible d'aller jusqu'à environ 1033 m NGF au niveau de la crête, à l'ouest du Col du Bel Homme) ;
- viennent ensuite la source du Clos, la source du Lavoir, la source du canal de la Poste et la source de la Doux qui sont sensiblement moins appauvries avec des valeurs comprises entre -7,48 et -7,35 en $\delta^{18}\text{O}$ et entre -46,2 et -45,8 en $\delta^2\text{H}$;
- ensuite il y a la source du Lauron, la source Couchoire, le ruisseau St Peyre, la ravine source Estuve et l'écoulement du Pont SNCF qui sont encore un peu moins appauvries en isotopes lourds que les points évoqués précédemment, avec des valeurs comprises entre -7,25 et -7,16 en $\delta^{18}\text{O}$ et entre -45,4 et -45,0 en $\delta^2\text{H}$;
- enfin, la source Bibiane et le ruisseau du Duech sont sensiblement moins appauvries en Oxygène 18 que les points précédents avec respectivement -7,06 et -7,08 en $\delta^{18}\text{O}$. L'écart avec le groupe précédemment décrit est dans l'incertitude de mesure, mais ce léger enrichissement pourrait s'expliquer par des processus d'évaporation qui ont effectivement pu se produire car la source Bibiane a été prélevée environ 30 m en aval de son émergence (dans

une rigole) et le ruisseau du Duech est peu ombragé dans le secteur des Estangs en amont du site de prélèvement.

Si l'altitude inférieure de l'émergence de la source du Lauron par rapport aux sources du Clos, du Lavoir et du canal de la Poste peut justifier un enrichissement en isotopes lourds de la molécule d'eau (Lauron à 379 m NGF environ contre 461 à 486 m NGF pour les autres), la position comparable de la source Couchoire (467 m NGF) aux autres sources du Centre-bourg ne semble pas cohérente, en première approche, avec le léger enrichissement constaté. Il est cependant à noter que l'interprétation de l'indice de saturation en dolomie a montré que la source de Couchoire présente un indice plus faible que celui de la source de la Doux qui sont pourtant toutes deux issues des calcaires du Jurassique, marquant un transit souterrain potentiellement plus court pour l'eau de la source de Couchoire. Le cumul de l'information apportée par les indices de saturation en dolomie et les signatures isotopiques de ces deux sources montre que le bassin d'alimentation de la source Couchoire est très probablement moins étendu que celui de la Doux (et des autres sources du centre-bourg) avec des altitudes sensiblement plus basses (jusqu'à potentiellement 832 m NGF pour la Doux, au sommet du Bois de la Coste).

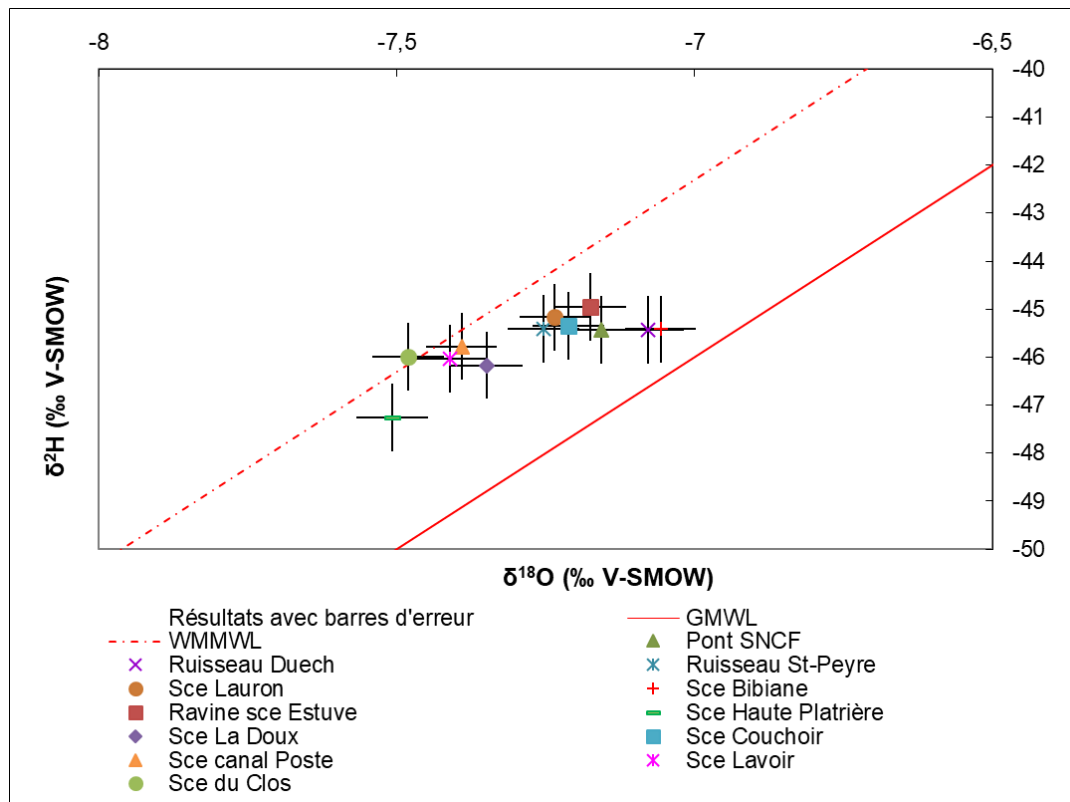


Illustration 72 : Zoom sur la signature isotopique des eaux en excluant le point excentré « Cave Virginie ».

c) Résultats des campagnes de mesure de la conductivité électrique

La relation linéaire existant entre la conductivité électrique et la concentration en sulfates des eaux sur la commune de Bargemon permet d'utiliser la conductivité électrique comme marqueur du phénomène de dissolution du gypse. Les huit campagnes de mesure réalisées permettent donc de compléter les deux campagnes de prélèvement pour identifier les écoulements saturés ou proche de la saturation en gypse témoignant de phénomènes actifs de dissolution du minéral.

Les cartes de deux campagnes sont présentées ci-après à l'illustration 73. Les six autres campagnes sont à l'Annexe 2. La carte des mesures du 02/03/2021 permet d'illustrer des conditions de hautes eaux tandis que celle du 22 février 2022 des conditions de basses eaux (présentation des conditions hydriques à l'illustration 51).

À partir des valeurs de conductivité électrique observées sur les différents points d'eau, cinq gammes de conductivité ont été définies pour comparer la minéralisation des eaux entre elles :

	< 600 $\mu\text{S/cm}$: valeurs considérées faibles
	600 à 1 250 $\mu\text{S/cm}$: valeurs intermédiaires
	1 250 à 1 800 $\mu\text{S/cm}$: valeurs élevées
	1 800 à 2 470 $\mu\text{S/cm}$: valeurs très élevées
	> 2 470 $\mu\text{S/cm}$: valeurs extrêmement élevées

Les résultats des différentes campagnes de mesure réalisées sont détaillés par secteur ci-après.

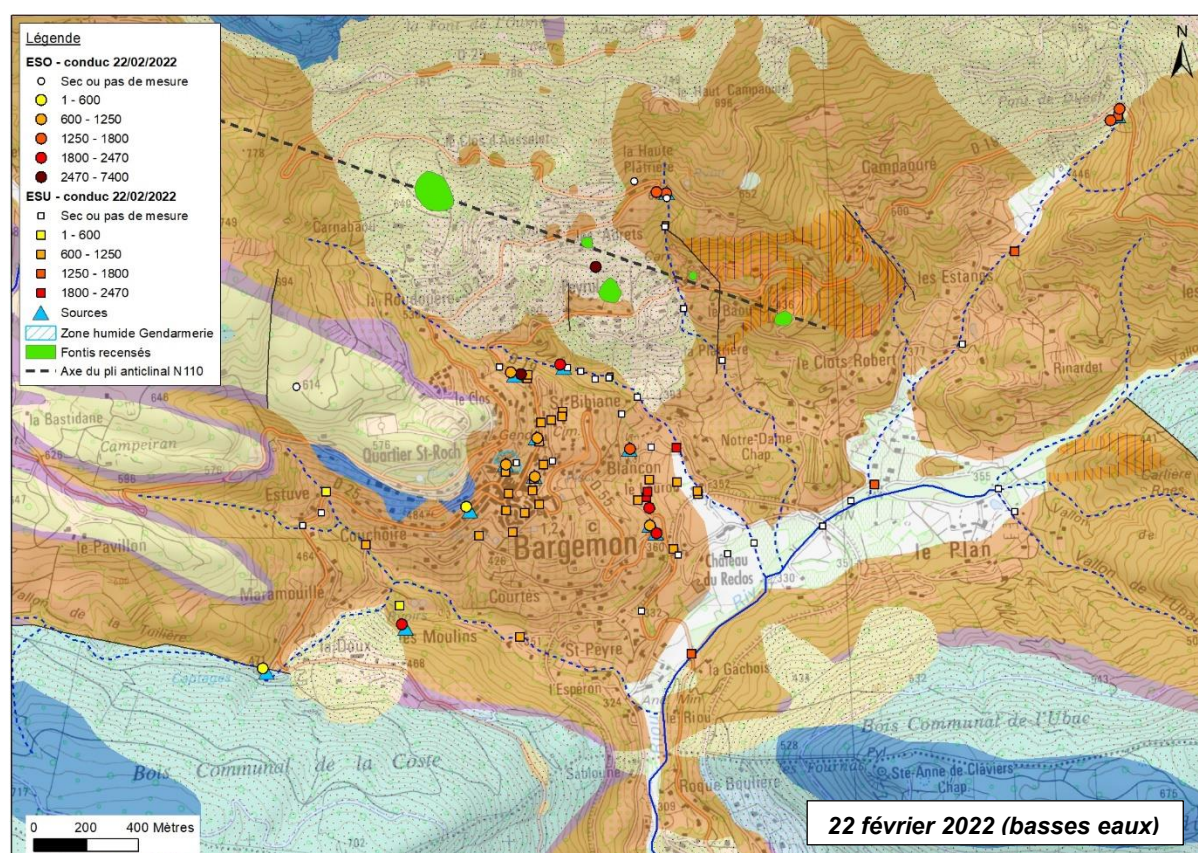
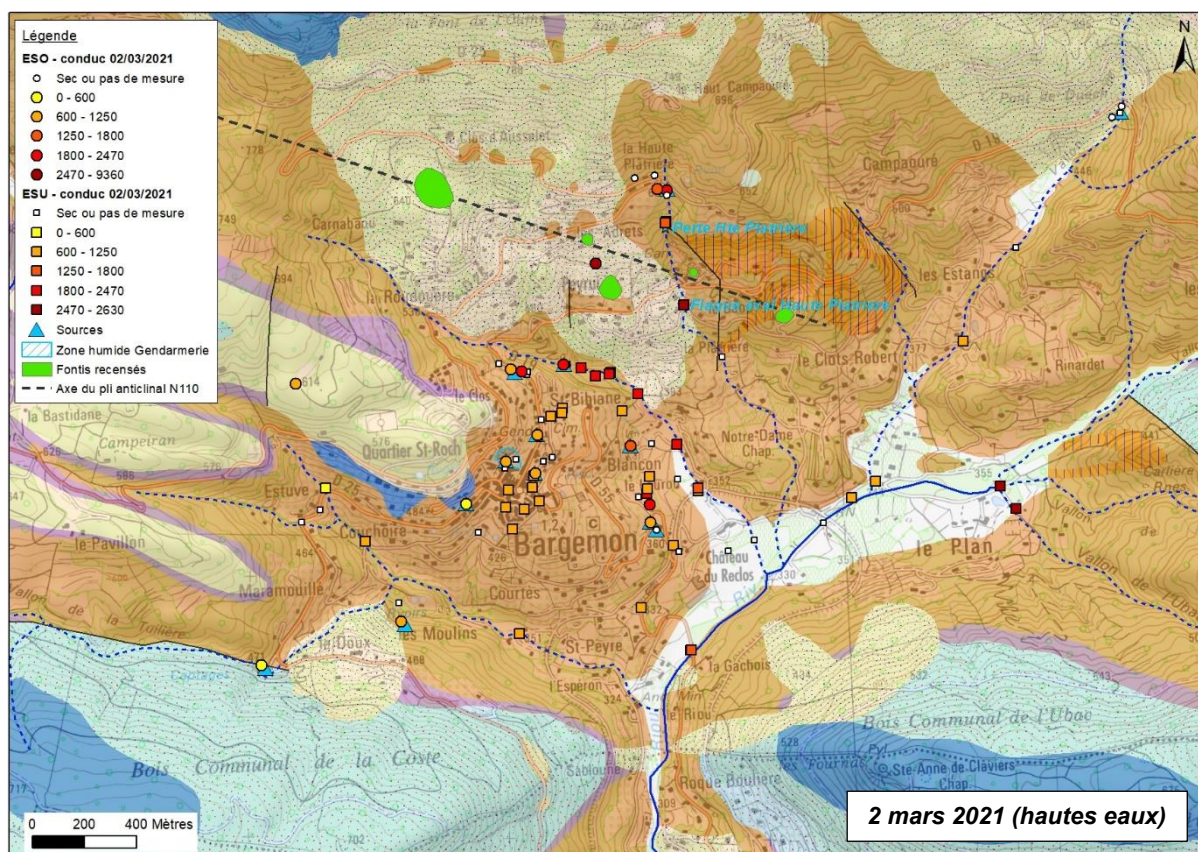


Illustration 73 : Cartes de deux campagnes de mesure de la conductivité électrique sur les eaux souterraines et les écoulements de surface sur la commune de Bargemon.

- Sources issues du Jurassique

En cohérence avec les résultats des analyses chimiques, la source de la Doux et la source Couchoire présentent des minéralisations faibles tout au long du cycle hydrologique, avec des conductivités électriques comprises entre 400 et 550 $\mu\text{S/cm}$. Elles ne drainent donc que les calcaires du Jurassique et ne sont pas influencées par le Keuper.

- Le ravin Estuve

Le ravin Estuve présente une minéralisation qui augmente de l'amont vers l'aval, en cohérence avec les résultats des analyses chimiques. En amont, lorsque l'écoulement est présent, la conductivité n'excède pas la gamme « faible » et se situe inférieure à 600 $\mu\text{S/cm}$, tandis qu'en aval les valeurs rencontrées ont varié de 1 130 à 1 280 $\mu\text{S/cm}$, témoignant de phénomène de dissolution du gypse entre ces deux points.

- Centre-bourg

Dans le centre-bourg de Bargemon, incluant le centre historique, le secteur de l'Avenue François Maurel, et jusqu'au lavoir de la rue Jean Jaurès, les écoulements issus des eaux souterraines ou de surface présentent une minéralisation intermédiaire avec des conductivités autour de 1 100 $\mu\text{S/cm}$, et ce, dans toutes les conditions hydriques rencontrées. Ces observations sont cohérentes avec le fait que ce sont les sources (du Clos, Lavoir et canal de la Poste) qui alimentent les fontaines et les canaux (caniveaux) de ce secteur. La source du Lauron, située en contrebas du village, sur la route de Claviers, présente également une minéralisation intermédiaire, quoique sensiblement plus faible, avec une conductivité située autour de 900 $\mu\text{S/cm}$. C'est également le cas pour la source Ste Bibiane située dans une propriété rue Jean Jaurès.

- Ste Bibiane – rue Jean Jaurès – route de Seillans

Dans le secteur de la source de Ste Bibiane, sur la route de Seillans, des désordres de surface sont connus (au niveau du 463 rue Jean Jaurès) (Illustration 74) et l'observation des écoulements d'eau et de leurs propriétés physico-chimiques permet de décrire les phénomènes en présence.



Illustration 74 : Photographies de la source Ste Bibiane (à gauche) et du mur de soutènement de la propriété au 463 rue Jean Jaurès au pied duquel se situe le piézomètre "Froute". L'affaissement de la route est visible sur la photo (marqué par la flèche orange).

La source Ste Bibiane est située en contre-haut de la route de Seillans. La position de la source s'explique *a priori* par la présence d'une lentille d'argile verte rapportée par le propriétaire qui l'a constatée lors de la construction de la maison. Cette lentille constitue un mur étanche qui favorise l'émergence de l'eau souterraine. La conductivité de la source Ste Bibiane est intermédiaire, avec des valeurs situées autour de 900 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Son débit est relativement faible, de l'ordre de 0,25 à 0,5 l/s lors des campagnes de mars 2021, décembre 2021 et février 2022.

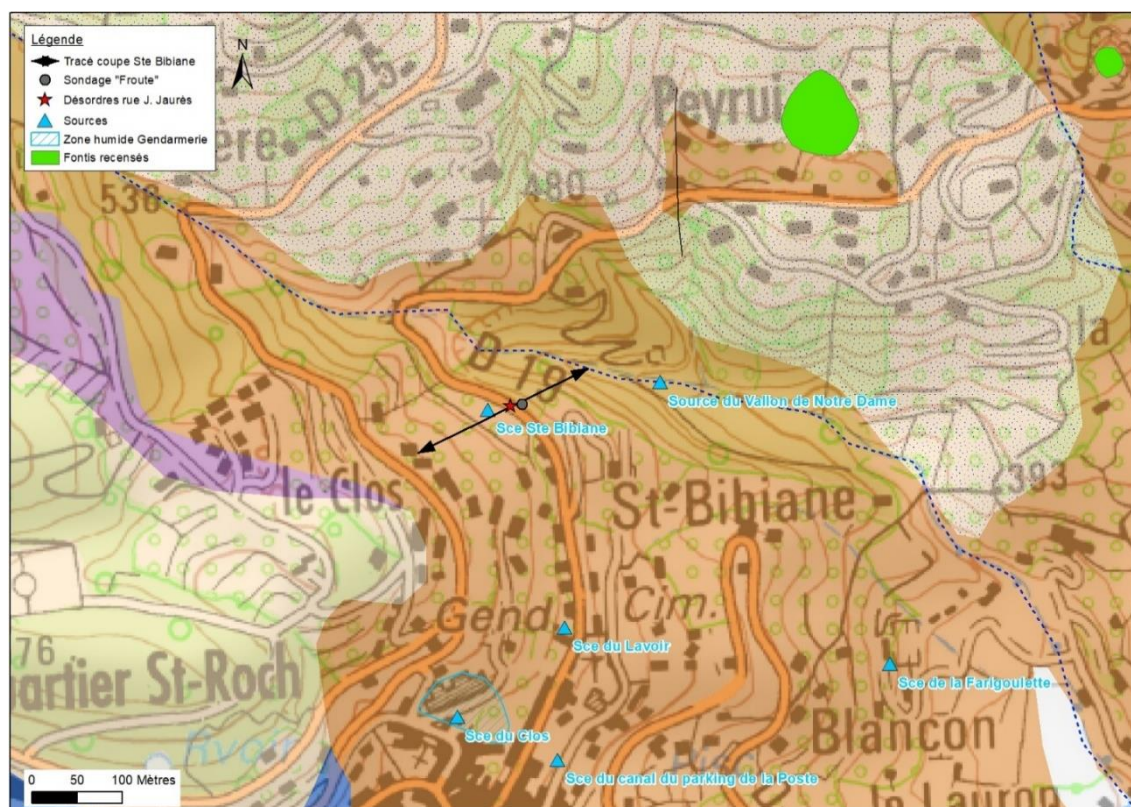


Illustration 75 : Carte du secteur du désordre de la rue Jean Jaurès localisant le tracé de la coupe hydrogéologique de l'illustration 77.

L'écoulement de l'eau de la source n'est pas géré et correctement canalisé ; l'eau s'infiltre autour de la maison de façon disparate.

Les diagraphies de conductivité électrique réalisées dans le piézomètre « Froute » implanté sur le bord de la route, en contrebas de la propriété, dans la zone impactée par les désordres, montrent que les valeurs rencontrées sont très élevées et situées entre 2 000 et 2 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Illustration 76). Il n'est pas démontré que ce piézomètre intercepte la zone saturée d'un aquifère, la hauteur d'eau présente dans le piézomètre peut ne constituer qu'une laisse d'eau qui ne soit pas ou peu renouvelée (profondeur du niveau d'eau peu variable situé entre 14 et 13,90 m de profondeur lors des trois diagraphies). Mais la minéralisation élevée de la colonne d'eau témoigne de phénomènes de dissolution du gypse autour de l'ouvrage.

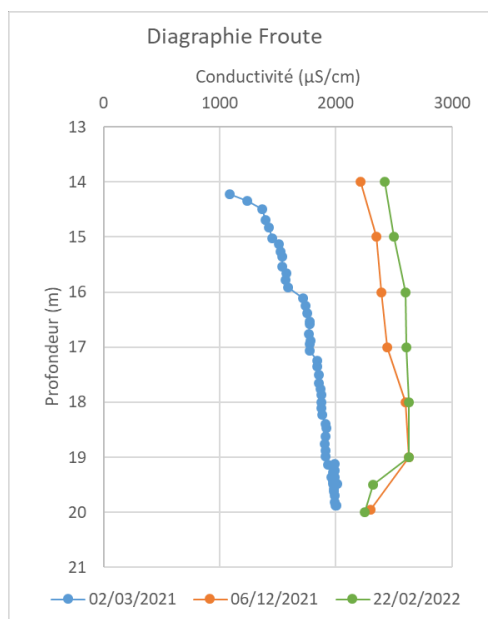


Illustration 76 : Diagraphies de conductivité électrique réalisées sur le piézomètre Froute.

Plusieurs sondages ont en outre été réalisés dans la zone de la route impactée par les désordres. Les coupes géologiques établies montrent la présence de gypse et des vides ont été observés à la foration (ERG, 2020).

Les observations réalisées montrent que le phénomène de dissolution du gypse générant des vides sous la route *a priori* été engendré ou est au moins entretenu par la ré-infiltration de l'eau peu minéralisée de la source Ste Bibiane. L'eau circule au contact du gypse et le dissout, générant des désordres et affaissements en surface (Illustration 78).

La gestion de ces désordres passe donc en premier lieu par la canalisation des écoulements issus de la source et leur évacuation dans le réseau d'eau pluvial pour éviter toute infiltration dans la zone. Une attention particulière devra être accordée à ce que l'ensemble des griffons de la source soit canalisé.

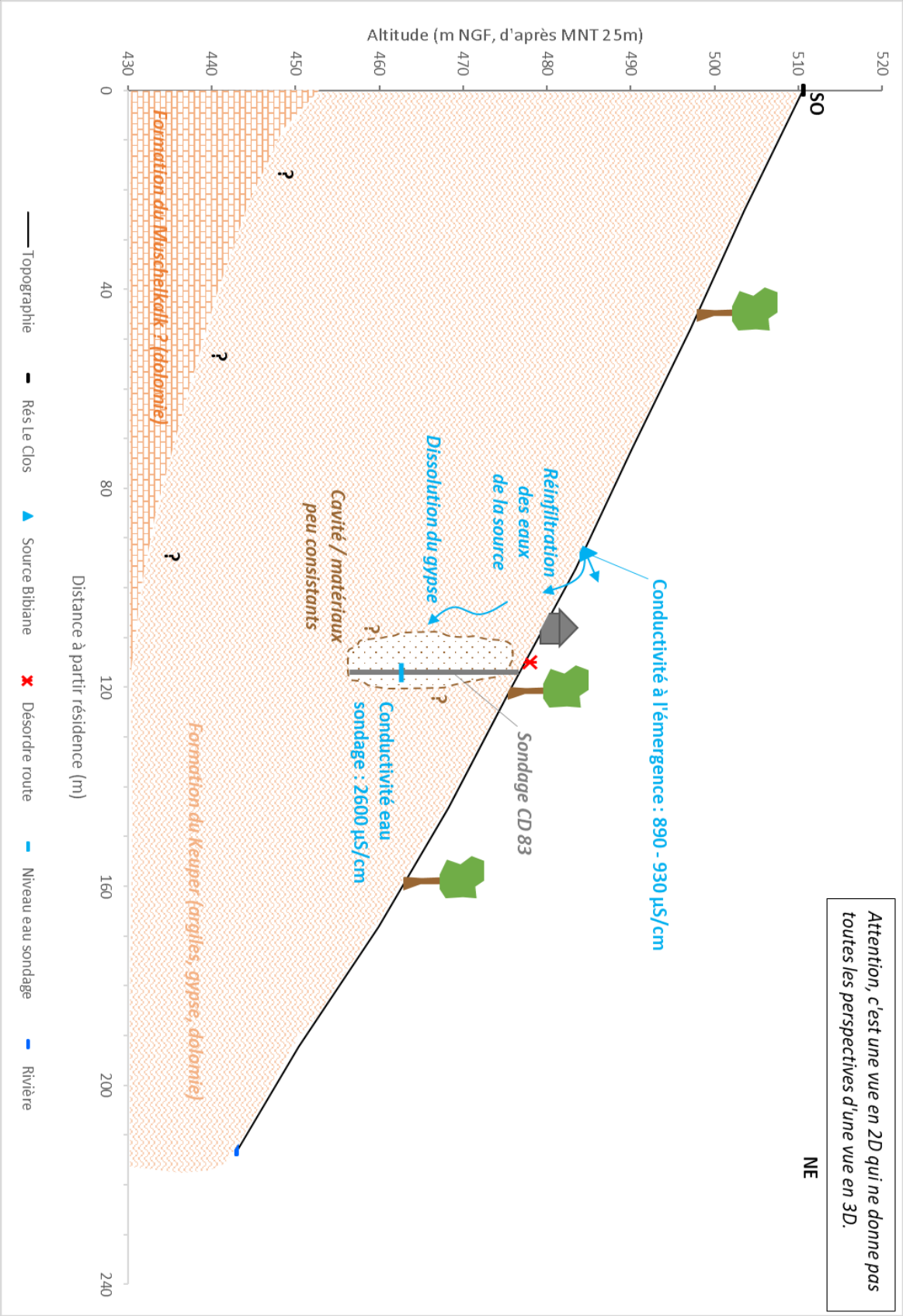


Illustration 77 : Coupe hydrogéologique du secteur du désordre de la rue Jean Jaurès et de la source Ste Bibiane © BRGM Gennevier.

- Haute Platrière

La source de la Haute Platrière présente, selon les campagnes, une conductivité élevée à très élevée. Il est intéressant de noter que le trop-plein de la source qui s'écoule en aval s'infiltré totalement environ 100 m en aval de l'émergence. Le débit constaté lors des différentes campagnes n'a jamais excédé 0,5 l/s. Aucune résurgence de cet écoulement n'a été observée en aval. Seule une laisse d'eau (une flaque d'eau) a été observée environ 400 m en aval de la perte en mars 2021 et présentant une conductivité classée extrêmement élevée. Ce système perte/résurgence minéralisée témoigne d'un phénomène de dissolution du gypse entre la source de la Haute Platrière, elle-même déjà minéralisée, et la laisse d'eau retrouvée.

- Peyrui

Au nord de l'effondrement du Peyrui, les cartes de l'illustration 73 présentent un point d'eau souterraine avec des valeurs de conductivité électrique de classe « extrêmement élevée ». Il s'agit du piézomètre FPey de 49 m de profondeur dans lequel des diagraphies de conductivité électrique ont été réalisées. Les valeurs rencontrées lors des différentes campagnes se situent entre 7 400 et 8 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Illustration 78). La colonne d'eau du piézomètre se caractérise donc *a priori* par une sursaturation en sulfates qui témoigne d'une dissolution intense du gypse autour de l'ouvrage. Ces observations donc cohérentes avec les résultats de la géophysique électrique dans ce secteur (cf. chapitre 3.5.3).

L'interprétation du suivi continu par une sonde de conductivité qui a été mis en place sur le piézomètre FPey complète cette première analyse du site (cf. chapitre 3.5.3).

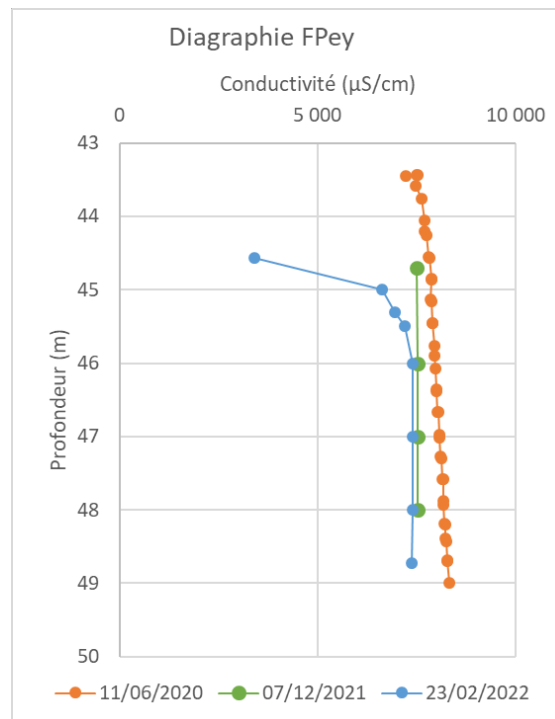


Illustration 78 : Diagraphies de conductivité électrique réalisées sur le piézomètre FPey.

- Vallon Notre Dame et sa source

Le vallon de Notre Dame est marqué par des valeurs de conductivité très élevées à partir de la source (Illustration 73) et sur tout son linéaire jusqu'à sa confluence avec le Riou, à proximité du Château du Reclos. Les différentes campagnes de mesure montrent que la conductivité de la rivière n'augmente pas vers l'aval. Elle se maintient équivalente à la mesure de la source, voire diminue sensiblement. Les valeurs de conductivité mesurées sur la source lors de trois campagnes varient entre 2 300 (décembre 2021) et 2 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (mars 2021 et février 2022), ce qui est proche d'un état de saturation de l'eau en sulfates d'après la relation linéaire qui relie la conductivité et la teneur en sulfates sur la commune de Bargemon. La stabilité des valeurs de conductivité en aval de la source peut être associée au fait que la rivière étant déjà saturée en gypse, elle n'a plus de potentiel de dissolution. Il n'est en outre pas à exclure que la rivière ne draine pas d'écoulements supplémentaires marqués par la dissolution du gypse en aval de la source. Dans ce cas, c'est uniquement le bassin d'alimentation de la source (souterrain) qui serait marqué par la mise en contact de gypse avec de l'eau résultant à sa dissolution.

Il est intéressant de noter que la source étant située en rive gauche du ruisseau, son bassin d'alimentation s'étend *a priori* vers le nord en direction du secteur de l'alignement des fontis (le Clos d'Ausset, les Adrets, le Peyrui), à savoir la zone qui est le siège d'une dissolution du gypse ayant généré des effondrements majeurs. L'extension précise du bassin d'alimentation de source n'est cependant pas connue.

- Ruisseau du Duech

Concernant le ruisseau du Duech, l'ensemble des campagnes de mesure confirme les résultats des analyses chimiques et montre qu'en période de hautes eaux, la conductivité électrique de l'eau est faible (inférieure à 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$, comme le 11 juin 2020 et le 13 décembre 2019) et devient intermédiaire à élevée en basses eaux. Ces observations montrent qu'au sein du bassin versant de la rivière, de l'eau circule au contact du gypse et le dissout. L'évolution saisonnière montre qu'en période de hautes eaux, les eaux impactées par la dissolution du gypse sont fortement diluées par des apports drainant les calcaires du Jurassique (comme l'ont montré les analyses chimiques). Lors des campagnes de mars 2021 et février 2022, deux à trois mesures de conductivité ont pu être réalisées sur le ruisseau, de l'amont vers l'aval. Les valeurs mesurées montrent qu'il n'y a pas d'évolution de l'amont vers l'aval : la conductivité est stable. Cela signifie qu'il n'y a *a priori* pas de phénomène de dissolution majeur entre la source du Duech et sa confluence avec le Riou, dans la plaine. C'est donc le bassin d'alimentation de la source en elle-même qui draine *a priori* des écoulements circulant au contact du gypse et le dissolvent.

- Vallon de l'Ubac

Lorsque ce ruisseau, affluent du Riou en rive gauche, coule, il présente une minéralisation élevée avec des conductivités très élevées à extrêmement élevées. Ce secteur n'a pas fait l'objet d'investigations poussées, notamment du fait d'un accès restreint, mais ces mesures ponctuelles montrent que des phénomènes de dissolution du gypse existent sur ce sous-bassin versant.

d) Dynamique des sources et forages suivis

- Les sources

Le suivi continu de la conductivité électrique réalisé sur les sources du Clos, du Lavoir, de la Haute Platrière et, en toute fin d'étude, du vallon de Notre Dame, permet de distinguer deux dynamiques différentes :

- dans un cas, la recharge des aquifères par les précipitations induit une baisse de la minéralisation de l'exhaure que constitue la source (voire n'a pas d'influence) ;
- dans un autre cas, la mise en charge des massifs par l'infiltration des précipitations induit une augmentation de la minéralisation de la source.

Ces deux dynamiques marquent un comportement différent du bassin d'alimentation de la source en question vis-à-vis du phénomène de dissolution du gypse et sont détaillées ci-après.

Le graphique de l'illustration 79 présente les chroniques de conductivité électrique enregistrées sur les sources du Clos, de la Haute Platrière et du Lavoir de janvier 2020 à février 2022, soient deux années. La chronique de la source du Vallon Notre Dame débute seulement en décembre 2021.

Concernant la qualité des données, il est à noter que le suivi de la source du Lavoir présente une lacune de mars à décembre 2021 et que les données enregistrées de nouveau à partir de fin 2021 apparaissent peu fiables (sonde défectueuse). Cette chronique est également marquée par des chutes rapides de la conductivité sur certaines périodes. Ces variations hautes fréquences ne semblent pas à relier à des variations effectives de la minéralisation de l'eau mais plutôt au fait que la sonde ait pu se retrouver plus ou moins hors d'eau du fait de la turbulence de l'écoulement à l'endroit où elle avait pu être installée. Le suivi sur la source du Vallon présente également des variations hautes fréquences. Elles sont ici à attribuer à l'envasement progressif de la sonde. C'est ce qui explique aussi le décalage entre la mesure manuelle effectuée fin février (symbole de croix de couleur mauve, 2 470 $\mu\text{S}/\text{cm}$) et les valeurs enregistrées par la sonde (environ 2 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$). La chronique de suivi sur la Haute Platrière est également marquée par des variations brutales de la valeur de conductivité. Elles sont à associer à des phénomènes d'envasement, ainsi qu'à l'exploitation de la source pour l'irrigation des jardins (légers déplacements de la sonde et mouvements d'eau dans le petit bassin où elle se situait). Quant à la chronique de la source du Clos, elle n'est pas bruitée et présente un suivi de bonne qualité.

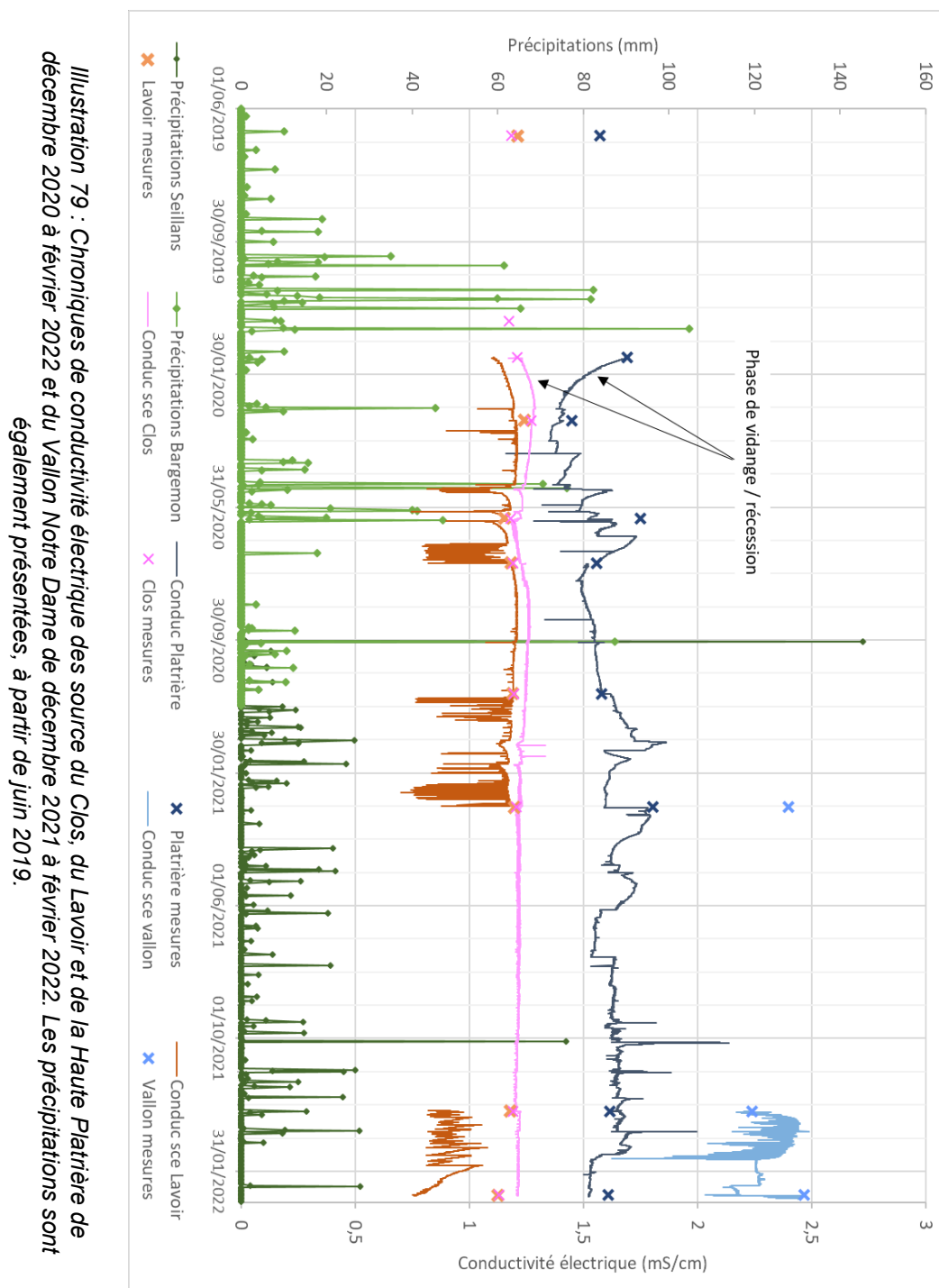
Le graphique présente les mesures de conductivité électrique réalisées ponctuellement lors des campagnes de mesure (symbolisées par des croix). Elles sont globalement cohérentes avec les valeurs enregistrées en continu par les sondes et permettent de valider les suivis.

Les suivis ont débuté en janvier 2020, soit en période de hautes eaux, à la suite des importants épisodes pluvieux qui ont eu lieu dans la région en novembre et décembre 2019. Les suivis montrent qu'entre janvier et mars 2020, tandis que la conductivité du Clos et du Lavoir était en phase d'augmentation (faible cependant, d'environ 1 200 à 12 70 $\mu\text{S}/\text{cm}$), celle de la Haute Platrière était en diminution (d'environ 1 700 à 1 450 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Ces deux dynamiques différentes lors de la phase de vidange des aquifères qui succède à la phase de recharge par les précipitations, montrent qu'il y a un effet de dilution sur les sources du Clos et du Lavoir tandis qu'il y a une augmentation de la minéralisation sur la Platrière.

Il apparaît donc que le processus de recharge mobilise des eaux plus minéralisées qu'en période de basses eaux sur la Haute Platrière. L'allure de la courbe de conductivité sur cette source (pointée par flèche sur l'illustration 79) qui est similaire à celle du niveau d'eau d'un aquifère en phase de vidange (aussi appelée récession) semble montrer qu'il se produit un lessivage de terrains contenant du gypse par l'eau infiltrée (effet piston) : les eaux de rétention présentes dans la zone non saturée du massif et qui ont eu le temps de se minéraliser au contact du gypse sont chassées par l'eau nouvellement infiltrée vers l'exutoire que constitue la source. Ce comportement témoigne d'une dissolution active du gypse dans l'emprise du bassin d'alimentation de la source de la Platrière. Cette source présentant cependant un débit faible (< 0,5 l/s d'après les estimations visuelles), la masse de gypse dissoute est faible.

Au contraire, l'effet de dilution observé sur les sources du Lavoir et du Clos montre qu'il n'y a pas de masses importantes de gypse dans leurs bassins d'alimentation.

Ces comportements sont également visibles sur les épisodes pluvieux de mai et juin 2020. La suite de la chronique ne met pas en évidence de nouvelle réelle phase de recharge par les précipitations, celles-ci ayant été très limitées (sécheresse persistante sur la région). L'important cumul de précipitations qui s'est produit le 2 octobre 2020 lors de la tempête Alex (145 mm enregistrés à Seillans) n'a pas engendré de recharge des aquifères dans le secteur, l'eau précipitée a totalement ruisselé (phénomène courant lorsque des précipitations intenses se produisent au cours ou à la fin de l'été, lorsque les sols sont secs).



- Suivi en continu sur FPey

Le piézomètre « FPey » est situé au-dessus de l'effondrement du Peyrui (au nord), à environ une cinquantaine de mètres du bord du cratère (localisation sur l'illustration 73). La coupe géologique et technique de l'ouvrage n'est pas connue et sa profondeur est de 49 m. Le suivi réalisé (Illustration 80) présente des données fiables de juillet 2020 à avril 2021 (au-delà, la sonde était défectueuse).

Sur cette période, le niveau d'eau dans le piézomètre n'a fait que diminuer, d'environ 70 cm (le léger décalage qui apparaît en novembre 2020 résulte d'une manipulation sur la sonde). Les oscillations enregistrées sur la chronique de niveau en mars et avril 2021 ne sont pas expliquées. La température enregistrée montre à l'opposé une sensible augmentation constante sur la période, de 13,75 à 13,82°C. L'évolution linéaire de ces deux paramètres, sans aucun effet des précipitations, montre que la colonne d'eau du piézomètre n'est pas reliée à l'aquifère et que l'ouvrage est colmaté.

La conductivité de la colonne d'eau présente quant à elle des fluctuations. Celle-ci diminue de juillet à début septembre 2020 de 10,7 à 9,4 mS/cm. Elle augmente ensuite jusqu'à début octobre 2020 où elle stagne à environ 9,9 mS/cm pour diminuer jusqu'à 9,5 mS/cm en novembre 2020 et enfin se stabiliser progressivement à 9,3 mS/cm. Ces fluctuations semblent pouvoir correspondre aux fluctuations réelles de l'aquifère autour de l'ouvrage mais qui sont tamponnées par le colmatage de l'ouvrage. La baisse de la conductivité au départ de la chronique semble correspondre à une dilution de la minéralisation de l'aquifère par l'apport abondant des précipitations sur le massif pendant l'hiver et le printemps 2020. La hausse qui s'en suit pourrait correspondre à l'arrêt de l'infiltration des pluies qui engendre la concentration de l'eau en minéraux (sulfatés *a priori*). Le pic de précipitations du 2 octobre 2020 (tempête Alex) semble être l'évènement qui stabilise la minéralisation de l'eau et la fait ensuite baisser. Les précipitations régulières qui se produisent ensuite semblent permettre le maintien d'une minéralisation stable.

Ces fluctuations de la minéralisation enregistrées sur la colonne d'eau du piézomètre sont à prendre avec circonspection et ne peuvent être directement utilisées pour interpréter les phénomènes de dissolution du gypse au sein du massif dans le secteur du Peyrui.

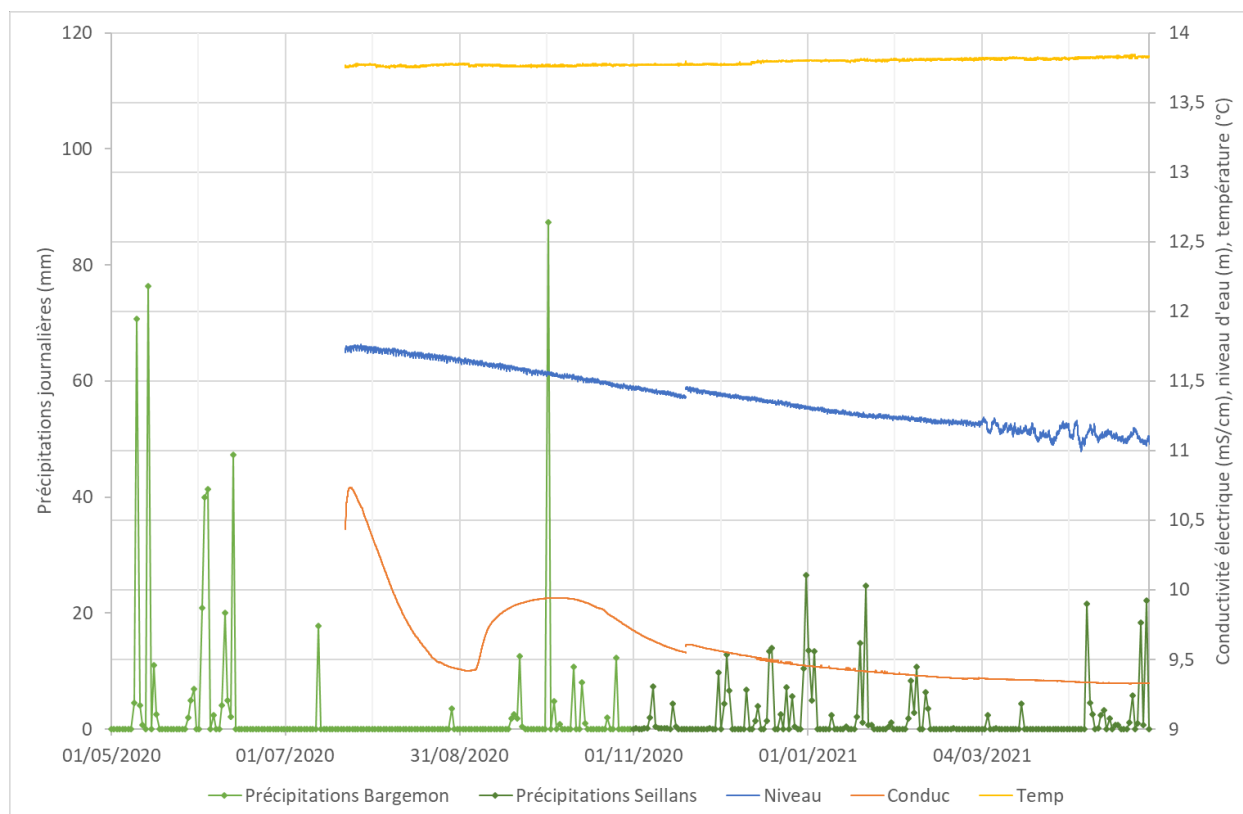


Illustration 80 : Chroniques de niveau d'eau, température et conductivité électrique enregistrées sur FPey de juillet 2020 à avril 2021, et chroniques de précipitations associées.

- Suivi en continu sur le forage du Stade

Le forage du stade et son piézomètre se situent sur la butte surmontant le village en direction du nord-ouest, au-dessus de la RD19 et au-dessus du stade.

La coupe géologique et technique du piézomètre du Stade n'est pas disponible, mais celle du forage exploité (Annexe 3) indique que le forage intercepte 86 m de calcaire fissurés dont les fissures sont remplies d'argile, puis du calcaire argileux et des marnes jusqu'à 92 m et enfin du gypse de 92 à 102 m. La coupe indique que le fond de l'ouvrage aurait été rebouché jusqu'à 89 m de profondeur pour ne pas capter la formation à gypse. Le piézomètre mesurant 92 m de profondeur, il capterait donc *a priori* les mêmes calcaires fissurés que le forage, à savoir les calcaires du Jurassique. Un pompage d'essai mené en août 1990 aurait déterminé un débit d'exploitation maximum de 3,5 m³/h, ce qui témoigne d'un potentiel aquifère faible.

La diagraphie de conductivité électrique et de température réalisée le 13 décembre 2019 (Illustration 81) met en évidence des valeurs homogènes de ces paramètres entre environ 74 et 84 m de profondeur. Cette portion correspond vraisemblablement à la partie crépinée de l'ouvrage. Ces valeurs homogènes s'expliquent par l'utilisation régulière du forage situé à proximité directe qui permet la circulation de l'eau dans l'aquifère dans l'emprise du cône de rabattement.

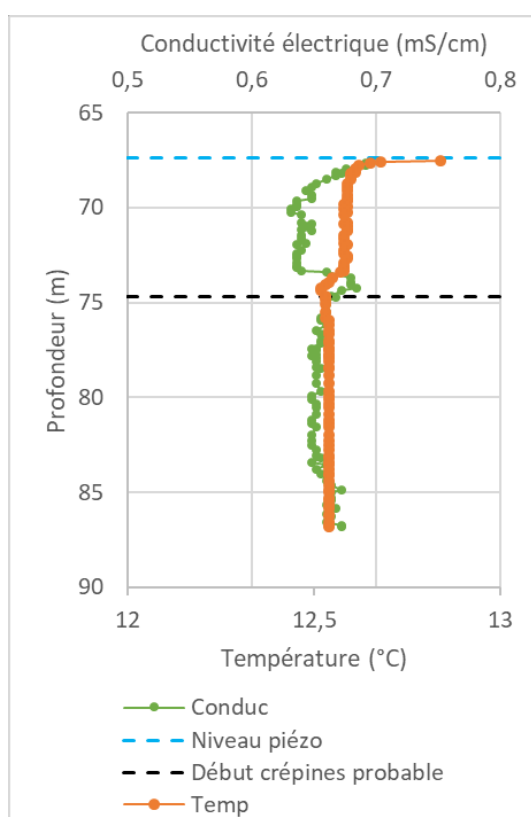


Illustration 81 : Diagraphe de la conductivité et de la température du piézomètre du stade réalisée le 13/12/2019.

La sonde CTD de suivi a été installée sur le piézomètre à environ 82 m de profondeur. Un suivi continu a été réalisé de mi-décembre 2019 à novembre 2020.

Le niveau piézométrique de la nappe interceptée par le piézomètre a globalement fluctué entre 546 et 566 m NGF sur la période. Ces niveaux sont donc supérieurs à l'altitude d'émergence des sources du centre-ville de Bargemon qui se situent entre 460 et 490 m NGF. Le massif des calcaires du Jurassique que capte le forage du stade présente donc une charge hydraulique supérieure à ces émergences *a priori* toute l'année, ce qui explique la pérennité de ces sources au moins en partie alimentée par ce massif.

L'exploitation du forage situé à côté du piézomètre induit, par la mise en route et l'arrêt des pompes, des fluctuations hautes fréquences du niveau d'eau suivi. Elles ne gênent cependant pas la lecture des fluctuations générales du niveau de la nappe.

L'importante mise en charge de l'ouvrage en décembre 2019 (hausse du niveau piézométrique d'environ 9 m) suite à l'épisode pluvieux majeur du 20 décembre 2019 (plus de 100 mm enregistrés sur la journée du 20/12) témoigne de la réactivité et donc de la bonne perméabilité de l'aquifère des calcaires du Jurassique (Illustration 82). Ces observations sont cohérentes avec l'aspect karstifié de ce massif décrit par le géologue (chapitre 3.2) qui favorise l'infiltration rapide des précipitations. La vidange est tout aussi rapide que la mise en charge. Les précipitations qui se produisent sur le reste de la période engendrent des hausses ponctuelles de faible amplitude du fait d'une infiltration efficace de l'eau réduite en raison de l'intensité de l'évaporation qui est élevée pendant la période estivale. L'évènement pluvieux du 2 octobre 2020 (tempête Alex) induit vraisemblablement une part d'infiltration de l'eau dans le massif car le niveau du piézomètre remonte de quelques mètres.

La mise en charge de fin 2019 s'accompagne d'une diminution significative de la conductivité électrique de l'eau du piézomètre (Illustration 83), ce qui témoigne d'un phénomène de mélange probablement avec les eaux d'infiltration des pluies. Cette dilution est parfaitement synchrone de la hausse de la charge hydraulique et montre qu'il n'y a pas de décalage entre le transfert de pression et le transfert de masse dans le massif. Cet effet de dilution est également observé sur les épisodes pluvieux de mai et juin 2020, à une échelle plus réduite.

Dès le début du mois de janvier 2020, la conductivité de l'eau du piézomètre augmente, de façon simultanée au changement de pente de la phase de vidange du niveau piézométrique. Ce moment correspond *a priori* à la date de fin d'infiltration des précipitations. La conductivité augmente ensuite de façon régulière jusqu'en mai. Elle varie ensuite ponctuellement en fonction des épisodes pluvieux, mais se maintient stable jusqu'à la fin de la période d'observation. Un doute est émis sur les valeurs absolues de conductivité mesurées par la sonde sur le piézomètre car il existe un décalage important avec les valeurs de conductivité mesurées au robinet du forage exploité (cf. graphique de l'illustration 83). La valeur de 930 $\mu\text{S}/\text{cm}$ autour de laquelle la chronique se stabilise n'est donc pas jugée représentative de l'aquifère mais les fluctuations relatives, notamment lors des épisodes pluvieux, sont validées.

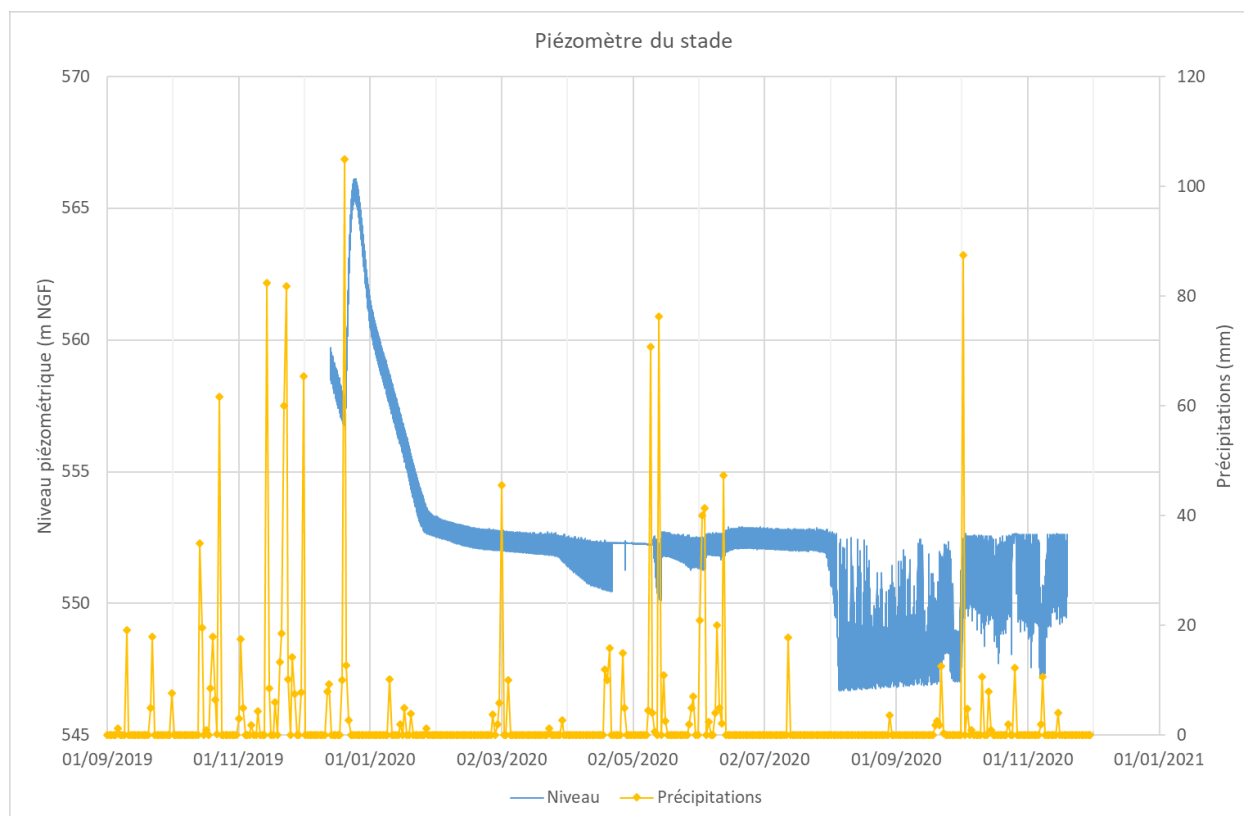


Illustration 82 : Chronique piézométrique du piézomètre du stade entre décembre 2019 et novembre 2020.

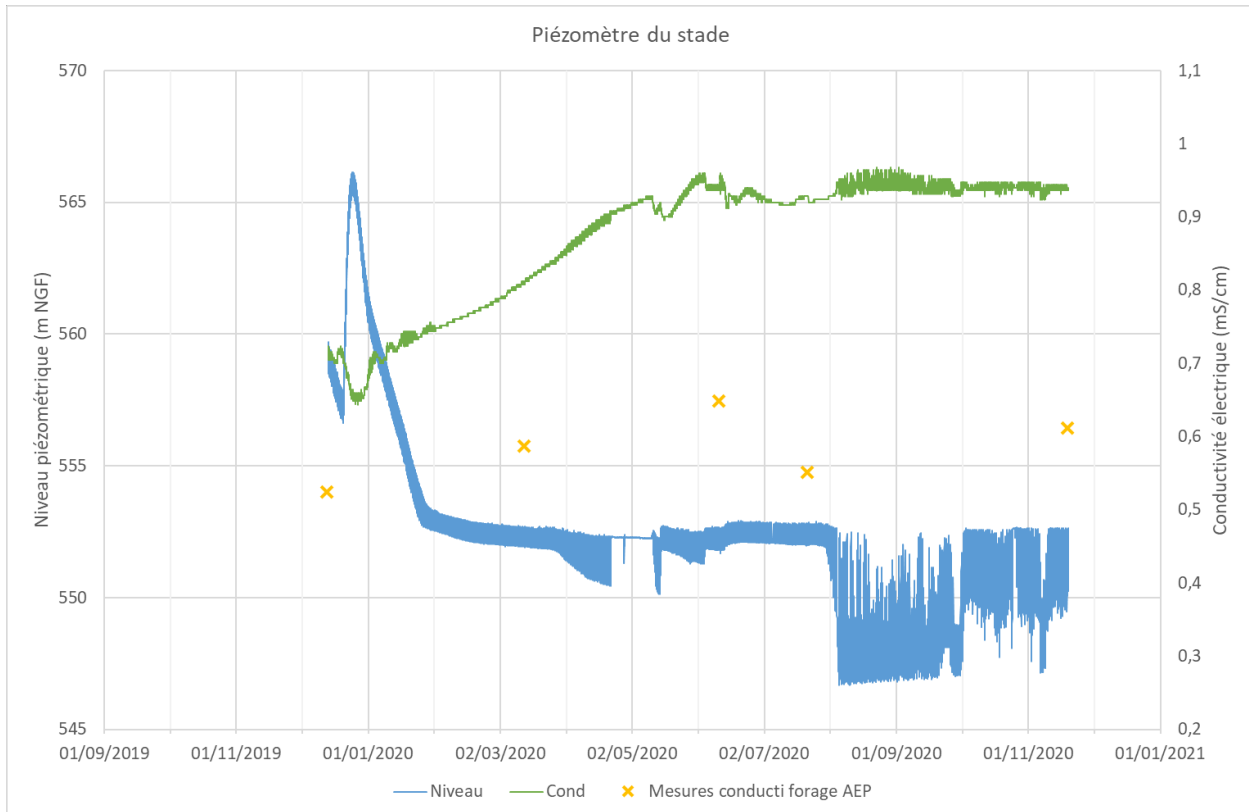


Illustration 83 : Chroniques du niveau piézométrique et de la conductivité électrique du piézomètre du stade. Les mesures ponctuelles de la conductivité sur le robinet du forage du stade sont également affichées.

e) Estimation du taux massique exporté de gypse et des surfaces d'échange équivalentes

Des recherches à L'Ineris²⁰ en partenariat avec le Centre Géosciences Mines Paris-Tech et l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse ont été menées afin d'améliorer la connaissance sur les mécanismes de dissolution du gypse et de développer des outils de modélisation permettant de quantifier l'évolution spatiotemporelle de systèmes de dissolution dans des environnements variés (Daupley *et al.*, 2015).

Partant du principe que la réaction de dissolution du gypse est stœchiométrique et que ce sont les sulfates qui sont le témoin de la dissolution du gypse (le calcium peut également être issu de la dissolution des calcaires et dolomie), il est possible de calculer une estimation du taux massique exporté de gypse par multiplication du débit d'écoulement d'un point d'eau par la concentration en sulfates.

Ensuite, à partir des travaux de recherche menés par l'Ineris en partenariat avec le Centre Géosciences Mines Paris-Tech et l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse (Daupley *et al.*, 2015), il est possible d'évaluer la surface d'échange « équivalente » de la lentille gypseuse (en m²) qui est soumise à la dissolution à partir du taux de masse de gypse mise en solution par unité de temps et de surface de contact avec le fluide (valeur calculée par essais laboratoires). Ce taux a été estimé entre 40 et 45 mg/m²/s (Daupley *et al.*, 2015).

²⁰ L'Institut National de l'EnviRonnement Industriel et des riSques

Les calculs ont été réalisés sur les sources proches du centre-ville à partir de l'estimation de leur débit lors de la campagne de juin 2019 et de la teneur en sulfates mesurée lors de cette même campagne. Les taux massiques exportés et les surfaces d'échange équivalentes calculés constituent donc *a priori* des valeurs sous-estimées puisque les conditions hydriques étaient proches de basses eaux (Illustration 84).

Source	Débit 26/06/2019 (l/s)	Teneur en sulfates 26/06/2019 (mg/l)	Taux massique exporté (mg/s)	Surface d'échange équivalente de lentille gypseuse (m ²)
Canal de la Poste	0.5	253.73	126.87	3
Clos	1	387.10	387.10	9
Lavoir	5.5	377.17	2074.44	46
Lauron	2.6	179.45	466.57	10

Illustration 84 : Taux massiques exportés et surface d'échange équivalente de lentille gypseuse calculés sur les sources du Canal de la Poste, du Clos, du Lavoir et du Lauron.

Les deux sources découvertes tardivement au cours de l'étude n'ont pas fait partie des points d'eau prélevés pour les analyses chimiques, mais leur teneur en sulfates a été estimée à partir de leur conductivité électrique mesurée lors de la campagne de février 2022 (conditions de basses eaux également) à partir de la relation linéaire liant la conductivité et la teneur en sulfates établie sur la commune (Illustration 85).

Source	Débit 22/02/2022 (l/s)	Teneur en sulfates estimée 22/02/2022 (mg/l)	Taux massique exporté (mg/s)	Surface d'échange équivalente de lentille gypseuse (m ²)
Traverse du Lauron	0.25	1107	276.75	6
Vallon Notre Dame	1	1270	1270	28

Illustration 85 : Taux massiques exportés et surface d'échange équivalente de lentille gypseuse calculés sur les sources de la Traverse du Lauron et du Vallon Notre Dame.

Schéma hydrogéologique conceptuel

L'interprétation de l'ensemble des observations et analyses menées permet d'élaborer un schéma conceptuel du fonctionnement hydrogéologique des aquifères présents sur Bargemon et les processus de dissolution du gypse qui y sont associés. La coupe hydrogéologique élaborée

sur le secteur du centre-ville est présentée à l'illustration 87 en associant avec la carte du contexte hydrogéologique localisant le tracé de la coupe à l'illustration 86.

La plupart des sources recensées sourdent au sein de la formation géologique du Keuper principalement constituée d'argiles, de gypse et de bancs de dolomie. Seules les sources de la Doux et de Couchoire sourdent au contact même entre les calcaires du Jurassique (l'aquifère) et le Keuper (le mur de l'aquifère). La source de la Doux est issue du massif du Bois de la Coste. La source de Couchoire est issue du massif surmontant le centre-ville, où se situe le stade. Comme déjà décrit par Arvois *et al.* en 1969, si la formation du Keuper constitue globalement un mur imperméable aux calcaires aquifères du Jurassique, des sources peuvent être localisées sous le contact. Elles sont ainsi décalées à des points topographiques inférieurs au contact Jurassique - Keuper à la faveur de niveaux dolomitiques qui favorisent la circulation des eaux au sein du Keuper. Il s'agit des sources du Clos, du Lavoir, de Ste Bibiane, du canal de la Poste, du Lauron et de la Traverse du Lauron. Le bassin d'alimentation de ces sources comprend donc *a priori* les calcaires du Jurassique surmontant le village et témoigne de la connexion hydraulique pouvant ponctuellement exister entre les calcaires du Jurassique et la formation du Keuper sous-jacente.

Les reconnaissances géologiques de terrain ne permettent pas de contraindre la géométrie des niveaux dolomitiques à l'origine des émergences, les conditions d'affleurement dans le centre-ville étant médiocres. Cependant, l'affleurement ponctuel de dolomie à proximité des émergences a bien été observé.

Exceptée la source du Lauron, les autres sources du centre-ville présentent des débits relativement faibles n'excédant pas plusieurs litres par seconde et avec une variabilité annuelle peu marquée. Le réservoir aquifère de ces sources apparaît ainsi globalement peu capacitif de type fissuré. La source du Lauron présente des débits sensiblement plus élevés, probablement à la faveur d'un banc de dolomie plus important et karstifié.

Très peu de données et observations ont été rassemblées concernant la source de la Traverse du Lauron, mais elle témoigne de phénomènes de dissolution active du gypse dans ce secteur correspondant au pied du flanc du village de Bargemon. La géométrie et l'extension des amas de gypse en cours de dissolution ne peuvent être contraintes à partir des données disponibles. Seuls des sondages de reconnaissance permettraient de les préciser.

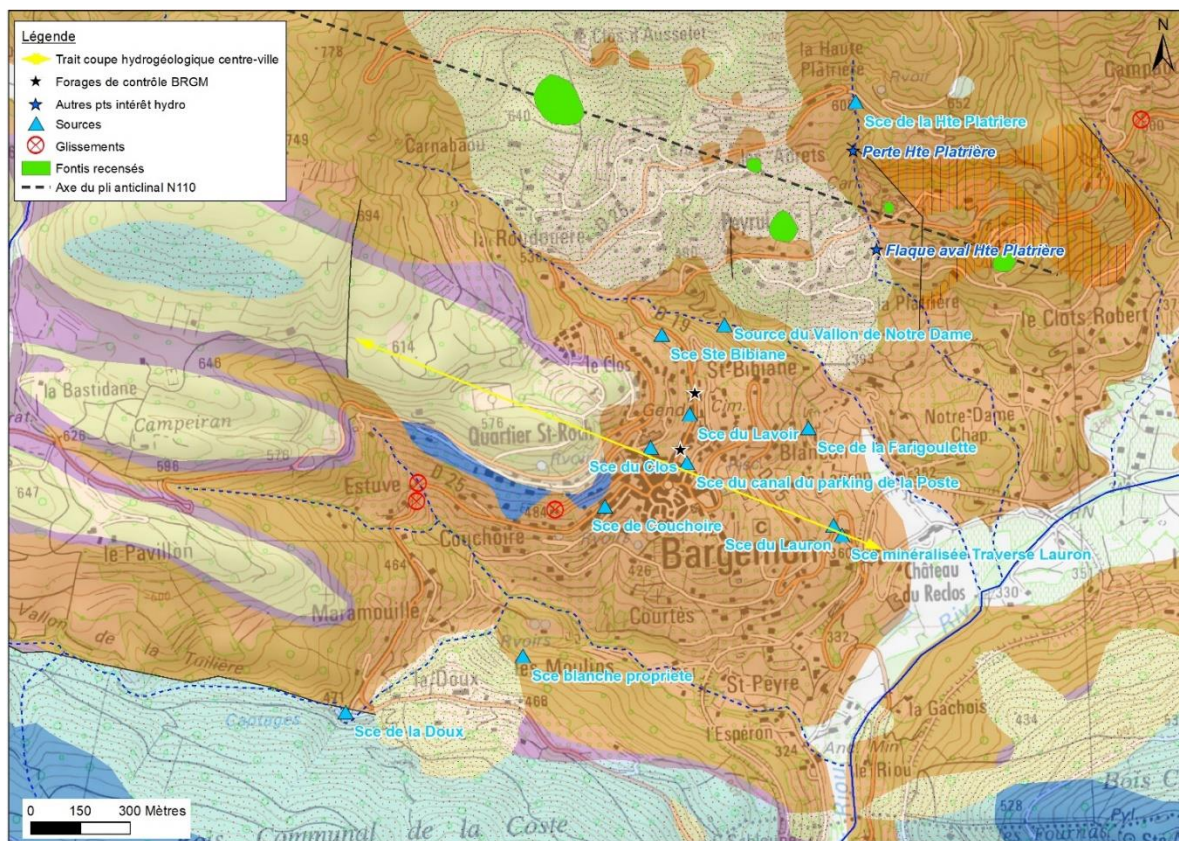


Illustration 86 : Carte du contexte hydrogéologique de Bargemon localisant le tracé de la coupe hydrogéologique dressée sur le centre-ville.

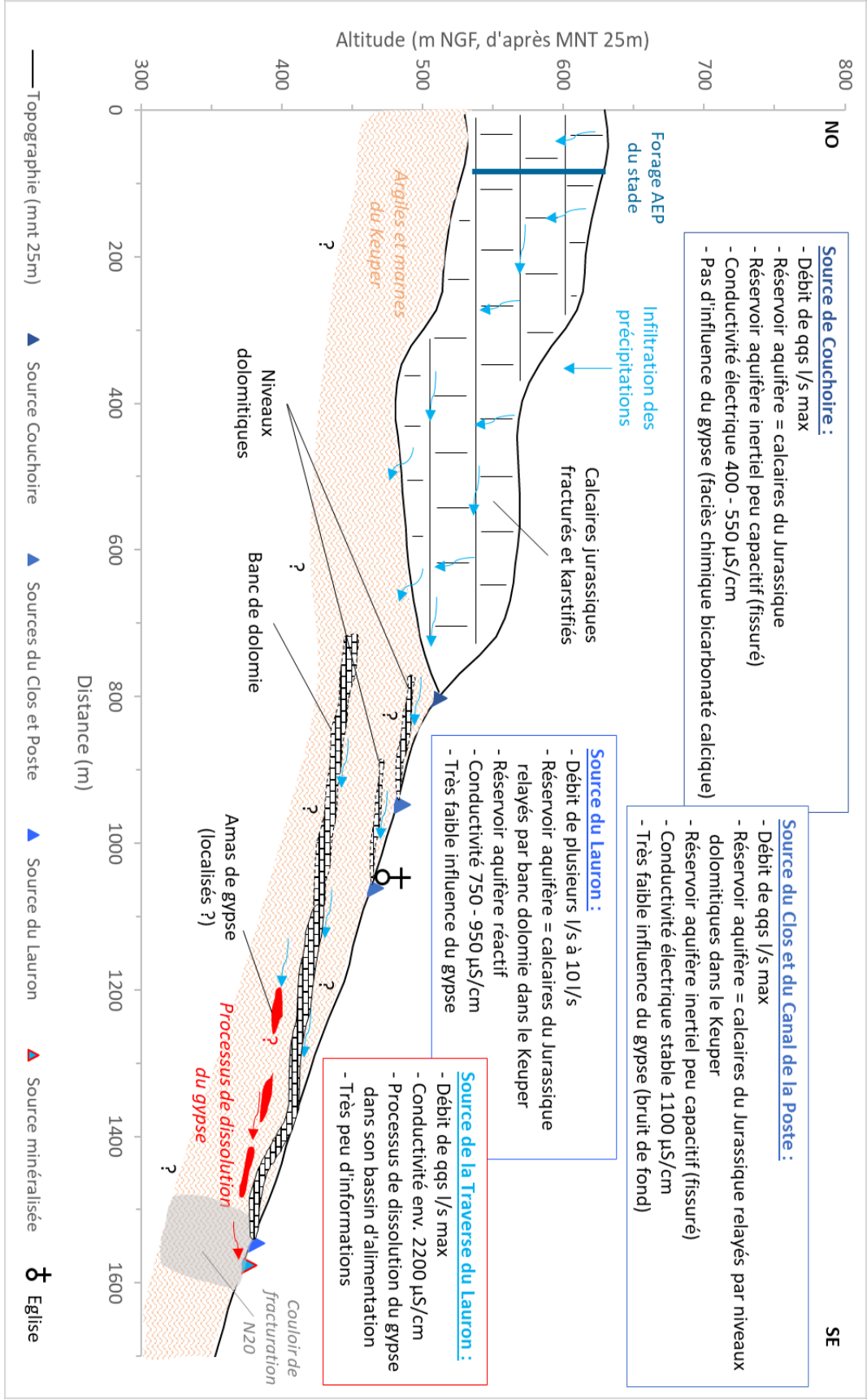


Illustration 87 : Coupe hydrogéologique dans le secteur du centre-ville de Bargemon restituant le schéma conceptuel du fonctionnement hydrogéologique des aquifères sur la commune © BRGM Gennevier.

Concernant le secteur nord de la commune, correspondant au flanc sud du col du Bel Homme et de la crête de Blaque Meyanne (Illustration 88), les principales sources recensées sont la source du Vallon de Notre Dame et la source de la Duech, toutes deux pérennes, ainsi que la source de la Haute Platrière, temporaire. Ces sources sourdent au sein du Keuper, et de façon similaire au secteur du centre-ville, elles bénéficient vraisemblablement d'apports en eaux issues des calcaires du Jurassiques constituant la crête du col du Bel Homme. Ces sources sont toutes marquées par des minéralisations élevées qui traduisent des phénomènes de dissolution du gypse. Ces observations d'ordre hydrogéologique sont cohérentes avec les observations géologiques menées et le recensement des fontis qui sont situés dans le cœur de l'anticlinal Sambourette Campaouré d'axe N110 au sein duquel des masses de gypse ont été reconnues.

La source du Vallon de Notre Dame située au pied du secteur où se situent les principaux fontis (le Clos d'Ausset, les Adrets, le Peyrui) constitue potentiellement un marqueur de l'activité hydrogéologique du massif vis-à-vis de la dynamique de dissolution du gypse, même si l'extension de son bassin d'alimentation n'est pas connue.

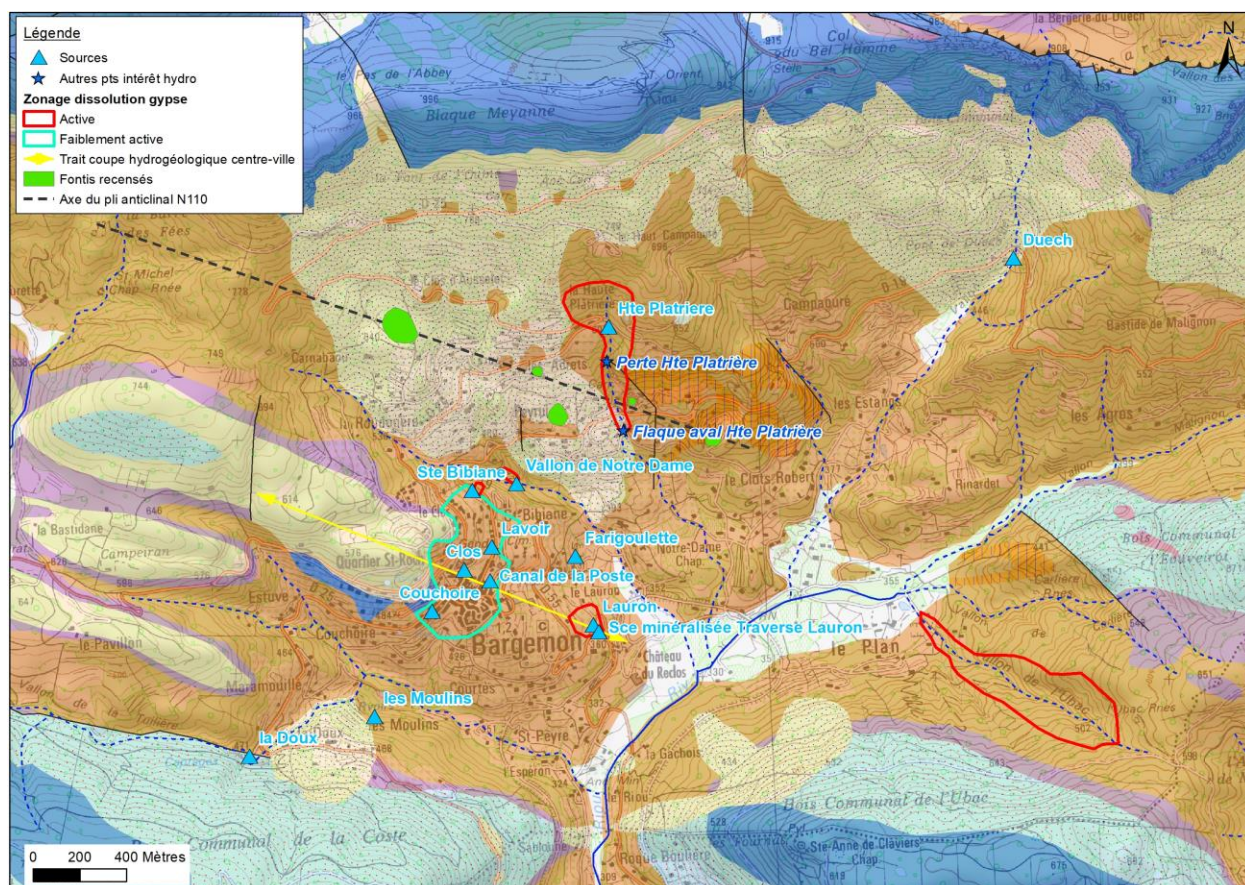


Illustration 88 : Carte présentant le contexte hydrogéologique du centre-ville et du versant nord de Bargemon. Le zonage de dissolution du gypse figure également.

f) Délimitation des zones de dissolution active

Sur la base des données et analyses disponibles sur l'état de saturation des écoulements d'eau en gypse sur la commune et des connaissances acquises sur le fonctionnement hydrogéologique des différentes formations géologiques, il est proposé la délimitation de zones de dissolution active et de zones jugées peu actives lorsque les données sont suffisamment nombreuses pour le déterminer.

Les contraintes de délimitation des zones reposent donc principalement sur :

- l'existence de mesures de conductivité sur les eaux sur plusieurs campagnes sur la zone délimitée (en plus des résultats des analyses chimiques). Le seuil minimal considéré sur les valeurs de conductivité pour justifier de la délimitation d'une zone de dissolution active est de 1 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (intègre la gamme des valeurs très élevées et extrêmement élevées) ;
- l'extension des bassins d'alimentation des points d'eau souterraine marqués par une dissolution active est basée sur une extrapolation à dire d'expert en prenant en compte les courbes topographiques des bassins versant de surface.

En effet, il est à noter que l'extension précise du bassin d'alimentation des sources de Bargemon n'est pas connue et restera à déterminer. Pour faire une première estimation de leur superficie, des bilans hydrologiques peuvent être réalisés à partir de la connaissance approximative de leur débit, des précipitations et de la part d'évapotranspiration. Cette analyse n'a pas été menée dans le cadre de la présente étude (non prévue dans la proposition initiale car nécessitant des moyens spécifiques).

Cinq zones de dissolution active ont été délimitées () :

- la zone au droit du désordre de la rue Jean Jaurès (au pied de la source Ste Bibiane) ;
- le bassin d'alimentation (délimitation à dire d'expert) de la source de la Traverse du Lauron, en intégrant une zone de suintement annexe (chemin d'accès au lieu-dit « Maison Blanche ») ;
- le bassin d'alimentation (délimitation à dire d'expert) de la source du vallon de Notre Dame ;
- le secteur de la Haute Platrière, intégrant la zone de perte de l'écoulement aérien de la source de la Haute Platrière ;
- le Vallon de l'Ubac. La délimitation amont définie n'intègre pas la superficie complète du bassin versant de surface et se limite à intégrer un linéaire du cours d'eau de 1 km.

Une zone de dissolution faible a été délimitée, à savoir le centre-ville, car suffisamment de données sont disponibles sur les eaux de surface et les eaux souterraines pour justifier que la dissolution du gypse dans le secteur est de faible ampleur et correspond au fond géochimique local.

En dehors des zones délimitées, il faut considérer qu'il n'y a pas assez de données disponibles sur les écoulements d'eau (souterrains et ou de surface) pour prouver qu'il y a dissolution ou qu'il n'y a pas dissolution du gypse.

3.4. MANIFESTATIONS ET IMPACTS EN SURFACE, VULNÉRABILITE DES BÂTIMENTS (CENTRE VILLAGE ET COMMUNE)

3.4.1. Objectifs

L'objectif de ce travail était de recenser à l'échelle de toute la commune et du cœur de village, les principaux dommages aux structures en recherchant les désordres par une observation de l'état des bâtiments (fissuration pouvant se rapporter à ce type de phénomène).

Ce travail a été mené par des experts structure du BRGM. Ce diagnostic **ne remplace pas et ne vaut pas valeur d'étude structure détaillée de type bureau d'étude spécialisé renseignant sur l'habitabilité de bâtiment notamment.**

Une cartographie des dommages est ainsi proposée à l'échelle de toute la commune de Bargemon, à l'échelle de groupes d'habitation bâtis, qui sera ensuite affinée sur le cœur du village dans l'analyse des risques.

Une limite de l'étude a été néanmoins soulevée : établir le nombre total de bâtiments dans la commune de Bargemon est difficile, car les sources de données disponibles sont incomplètes et ont tendance à se contredire.

3.4.2. Contexte urbain de Bargemon

Les bases de données vecteur disponibles, la BD TOPO de l'IGN et la BD PARCELLAIRE, dénombrent respectivement 1503 bâtiments de type "indifférencié" (correspondant largement aux bâtiments d'usage pour le logement) dans le cas de la BD TOPO et 2302 bâtiments dans le cas de la BD PARCELLAIRE. Cet écart s'explique en partie par le fait que la BD PARCELLAIRE, qui est établie en utilisant la BD TOPO comme une de ses sources, découpe certains des bâtiments en fonction des limites des parcelles cadastrales (un seul bâtiment chevauchant plusieurs parcelles peut ainsi apparaître comme plusieurs bâtiments).

Toutefois, il faut également noter qu'une partie des polygones dans ces deux bases de données correspondent à des garages et autres petites bâtisses (c'est le cas de la plupart des bâtiments avec moins de 10 m² de surface recensés). Certains bâtiments aux formes irrégulières sont également découpés en plusieurs polygones. Un travail de filtrage des petits bâtiments et de fusion des bâtiments multi-polygones a été effectué afin de préparer une couche de polygones de travail adaptée aux fins de la présente étude.

Les données vecteur ont également été contrastées avec les données sur le logement de l'INSEE, les données de 2017 (publiées en 2018) étant la version la plus à jour disponible en téléchargement.

Ces données statistiques permettent de dessiner une image de Bargemon comme une commune avec un parc de logements où les résidences secondaires et de vacances jouent un rôle très important (seulement la moitié des logements à Bargemon sont utilisés comme résidence principale).

L'INSEE (Illustration 89) publie également des données sur la typologie (maisons ou appartements) et la date de construction des logements principaux, ce qui permet de préciser l'histoire de l'urbanisation de Bargemon et apporte une première information importante pour l'évaluation de la vulnérabilité, les bâtiments plus âgés présentant souvent plus de défauts structurels et ayant subi des éventuels tassements cumulatifs pendant une période de temps plus longue. Malheureusement, ces statistiques sont uniquement disponibles pour les logements principaux et il est difficile d'en tirer des parallèles pour les résidences secondaires (qui souvent sont plus récentes, par exemple, et ne présenteront pas la même répartition par tranche d'âge). Un autre détail à prendre en compte est le fait que l'INSEE fait référence uniquement à des appartements, sans les regrouper par bâtiments.

On observe toutefois une différence importante entre les classes d'âge des maisons vis-à-vis de celles des appartements : plus de la moitié (57,5 %) des appartements utilisés comme résidence principale ont été construits avant 1919, tandis que pour les maisons cette première tranche d'âge correspond uniquement à 19,9 % du total. Cela reflète un centre-ville historique constitué essentiellement d'appartements, tandis que les maisons sont situées aux alentours du bourg principal et dans les zones moins densément édifiées.

Dans tous les cas, le nombre de logements indiqués par l'INSEE est nettement inférieur au nombre de bâtiments indiqués par les base de données en polygones, ce qui confirme l'hypothèse que plusieurs des polygones ne correspondent pas à des bâtiments d'usage habitation.

Logements en 2017	Résidences principales en 2017	Rés. secondaires et logts. occasionnels en 2017	Logements vacants en 2017
1268	631 (49,8 %)	443 (35,0 %)	194 (15,3 %)

Résidences principales type maison en 2017 - Total : 382						
ant. 1919	1919 à 1945	1946 à 1970	1971 à 1990	1991 à 2005	2006 à 2014	apr. 2015
76 (19,9 %)	10 (2,6 %)	49 (12,8 %)	120 (31,4 %)	84 (22,0 %)	42 (11,0 %)	1 (0,3 %)

Résidences principales type appartement en 2017 - Total : 442						
ant. 1919	1919 à 1945	1946 à 1970	1971 à 1990	1991 à 2005	2006 à 2014	apr. 2015
142 (57,5 %)	20 (8,1 %)	19 (7,7 %)	47 (19,0 %)	9 (3,6 %)	8 (3,2 %)	2 (0,8 %)

Illustration 89 : Données INSEE (2017).

Afin d'obtenir une meilleure idée de l'âge des constructions dans Bargemon, la base de données GHS-BUILT a également été consultée (Illustration 90). Cette base de données présente une analyse des zones urbanisées détectées par le satellite Landsat²¹. Une analyse multi temporelle permet de mettre en avant les zones où des différences ont été détectées entre différents passages du satellite. Ces analyses ont des imprécisions importantes (par exemple, une grande partie du centre-ville médiéval n'a pas été détecté), mais peuvent apporter une vision d'ensemble sur le développement de la commune. D'après ces images, l'urbanisation se serait développée vers le sud avant l'année 2000, avec une urbanisation plutôt vers le nord et toujours plus distante du centre-ville à partir de 2000.

²¹ LandScan plateforme mettant à disposition les données satellitaires LandSat (3 satellites multicanaux)

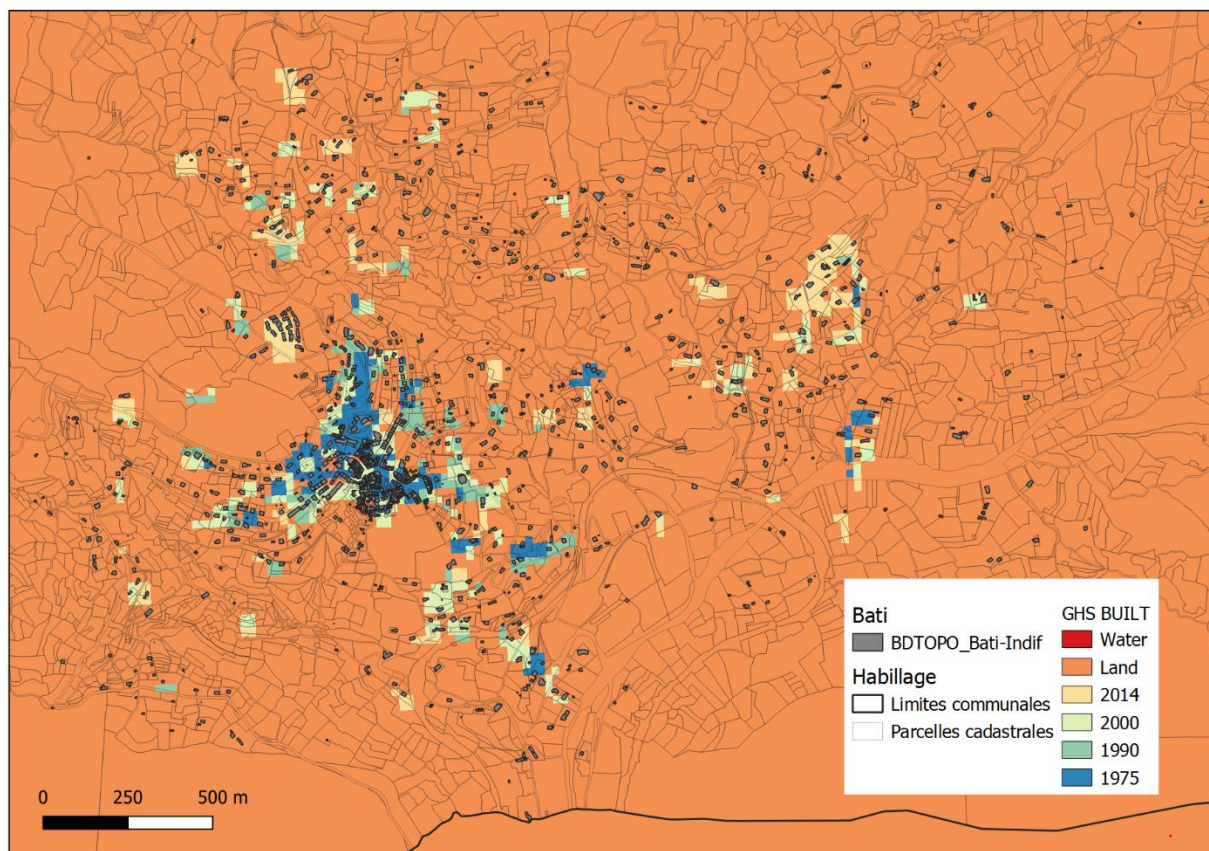
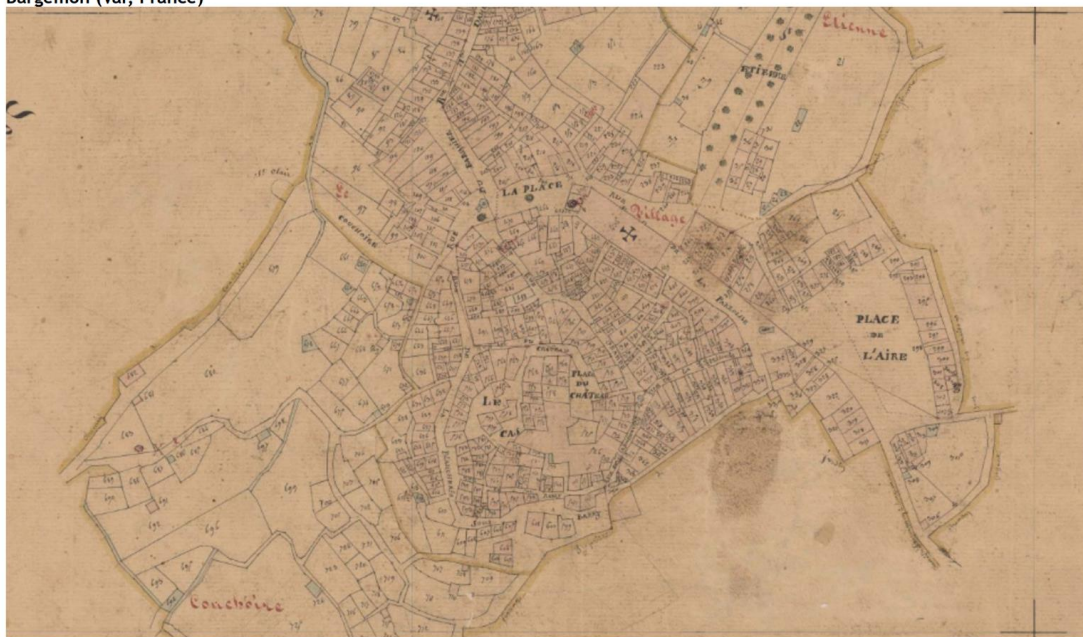


Illustration 90 : Carte issue de la base de données GHS-BUILT sur la commune de Bargemon.

Dans les Archives Départementales du Var, on peut également consulter deux versions du cadastre historique, le cadastre « napoléonien » datant de 1837 (Illustration 91) et le cadastre « rénové » de 1938 (Illustration 92). Ces deux images permettent de reconstruire l'évolution du centre-ville historique avec l'apparition de l'Avenue Pasteur et la Rue de Couchoire au nord, et la rue Jean Jaurès à l'est. En comparant ces cartes avec l'état actuel, on voit que le centre-ville à urbanisation dense est resté relativement inchangé depuis cette époque, avec des nouvelles urbanisations concentrées dans le prolongement de ces dernières zones (Route de Borvès et Route de Comps vers le nord et Route de Seillans vers l'est).

Bargemon (Var, France)



© Archives départementales du Var, droits réservés.

Illustration 91 : Cadastre « napoléonien » datant de 1837 sur Bargemon (Archives Départementales du Var).

Bargemon (Var, France)



© Archives départementales du Var, droits réservés.

Illustration 92 : Cadastre « rénové » de 1938 sur Bargemon (Archives Départementales du Var).

3.4.3. Évaluation des dommages

Deux évènements d'endommagement atteignant des bâtiments ont marqué l'histoire de Bargemon :

- l'effondrement brutal au lieu-dit Trou du Peyrui, ayant atteint certains bâtiments type maisons individuelles ;
- l'affaissement du bâtiment dans la Rue Marceau, ayant nécessité l'évacuation et l'étaiyage du bâtiment.

Il s'agit dans les deux cas de dynamiques d'endommagement bien distinctes, l'une rapide (effondrement soudain) et l'autre plus ou moins lente (affaissement avec le temps), liées très probablement à des phénomènes différents. Dans les paragraphes suivants, les dégâts et les facteurs de vulnérabilité évoqués se concentreront essentiellement sur le risque d'affaissement/tassement différentiel qui notamment concernerait entre autre le centre bourg. ements sont attendus.

Les endommagements observés à Bargemon, sont en effet plus cohérents avec des jeux différentiels du terrain en tassement et/ou en affaissements liés à des vides souterrains franc ou diffus. C'est un risque qui peut être géré soit à travers du renforcement du bâti existant, moyennant des reprises en sous-œuvre des bâtiments endommagés et des travaux de rigidification et contreventement des structures, soit à travers de stratégies de prévention, en réalisant des études de sol appropriées avant des nouvelles édifications.

Dans le cadre du présent projet, une campagne d'identification des bâtiments endommagés a été menée, avec le but d'identifier les types de désordres représentatifs et essayer d'en déduire les causes potentielles. Cette campagne a pris la forme de 4 jours de visites de terrain, où des agents du BRGM ont réalisé des évaluations visuelles des bâtiments dans différents secteurs bâtis de Bargemon.

Étant donné le grand nombre de bâtiments estimé (plus d'un millier), cette analyse n'a évidemment pas pu être exhaustive. Elle s'est concentrée en particulier sur le centre-ville plus ancien de la commune, où du fait notamment de l'âge des bâtiments et donc de la vulnérabilité, des dégâts plus importants étaient attendus. Toutefois, une couverture relativement bonne de la commune a pu être réalisée, avec l'exception de la zone à l'ouest (route de Callas) qui n'a pas pu être couverte par manque de temps. On remarque par ailleurs que dans les alentours de Bargemon l'analyse a été souvent empêché par la présence de grilles et clôtures ne permettant pas une assez bonne observation des bâtiments.

À l'issue de la visite, 451 bâtiments ont été inspectés en détail (soit entre un tiers et la moitié du parc total estimé), avec prise de notes et de photographies. Sur la base des observations, une échelle de dommages a été établie, afin de classifier les typologies de dommages observés (Illustration 93).

La catégorie 4 concerne uniquement les bâtiments à l'entrée de la Rue Marceau, ainsi que deux bâtiments en aval de la zone du trou du Peyrui qui étaient sur le point d'être démolis lors de la visite de terrain.

À la suite des visites de terrain, les bâtiments identifiés comme faisant partie de la catégorie de dommages la plus forte encore habitée (notation 4) ont par ailleurs été communiqués dans un courriel à la commune, dans le but d'éviter des situations de danger pour la population.

La représentation cartographique des bâtiments endommagés (Illustration 85) a permis par ailleurs d'établir la présence de zones où plusieurs bâtiments endommagés se regroupent. Cela permet d'évoquer des hypothèses où les désordres constatés seraient imputables plutôt à des problèmes collectifs liés au du sol ou au sous-sol, plutôt qu'à des défauts individuels au niveau des structures.

Par soucis de confidentialité et afin d'éviter que des bâtiments précis soient identifiables pour des fins qui vont au-delà du cadre de la présente analyse, la représentation des dommages prend la forme d'une « heatmap » (carte de fréquentation) : les bâtiments ont été convertis en une grille carrée de 20 m de longueur où la couleur indique la notation moyenne des bâtiments contenus dans la grille. Cette grille contient des valeurs uniquement dans le cas où au moins un bâtiment aurait été analysé au sein du carré.

Notation	Description des dommages caractéristiques
0	Aucun dommage.
1	Fissuration légère atteignant des éléments décoratifs (enduits de façade), n'impactant probablement pas la structure porteuse. Vétusté générale du bâtiment.
2	Fissures s'organisant dans des formes typiques associées à des problèmes des fondations ou du sous-sol, c'est-à-dire, apparition de fissures diagonales dans les coins des ouvertures et/ou "découpage" de la façade en trumeaux verticaux. Les fissures observées ne se répercutent probablement pas sur les éléments porteurs mais témoignent des instabilités légères à modérées.
3	États de fissuration suffisamment avancés pour permettre de soupçonner que les murs porteurs seraient atteints sous l'enduit. Murs présentant des déformations ou des signes de désolidarisation du reste du bâtiment. Arcs présentant des signes de décompression ou linteaux de fenêtres fracturés.
4	Dommages nécessitant probablement la mise en place de mesures conservatrices à court ou à moyen terme. Fissures de largeur centimétrique et probablement traversantes, murs bombés et/ou désolidarisés du reste de la structure. Éléments structurels ou décoratifs menaçant la chute sur des passants.
5	Bâtiment en ruines.

Illustration 93 : Classification des typologies de dommages observés sur le bâti de Bargemon.

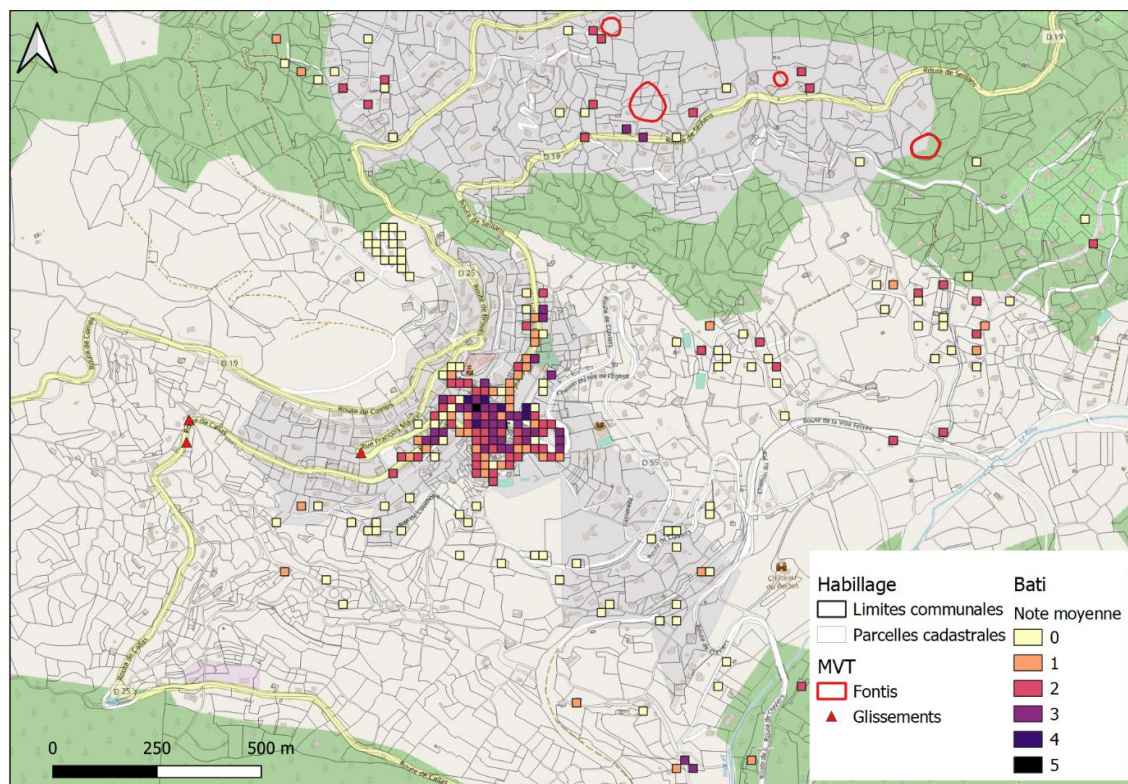


Illustration 94 : Représentation cartographique des bâtiments endommagés sur Bargemon sous forme d'une heatmap (carte de fréquentation).

Une analyse de la carte met en évidence :

- la présence d'un axe où les dégâts se concentrent dans le centre-ville de Bargemon le long de rues Marceau, le bas de la rue François Maurel. Les dégâts concernent non seulement les bâtiments du XVI-XVII^e siècles, mais aussi des bâtiments plus modernes. Cet axe se prolonge dans le cœur médiéval le long de la rue Gabriel Péri ;
- un deuxième noyau de bâtiments endommagés le long de l'Avenue Pasteur ;
- une absence relative de dommages dans les zones rurales au sud de la commune ;
- des signes de dommages qui s'intensifient vers les zones rurales à l'est de la commune, dans l'alignement des fontis.

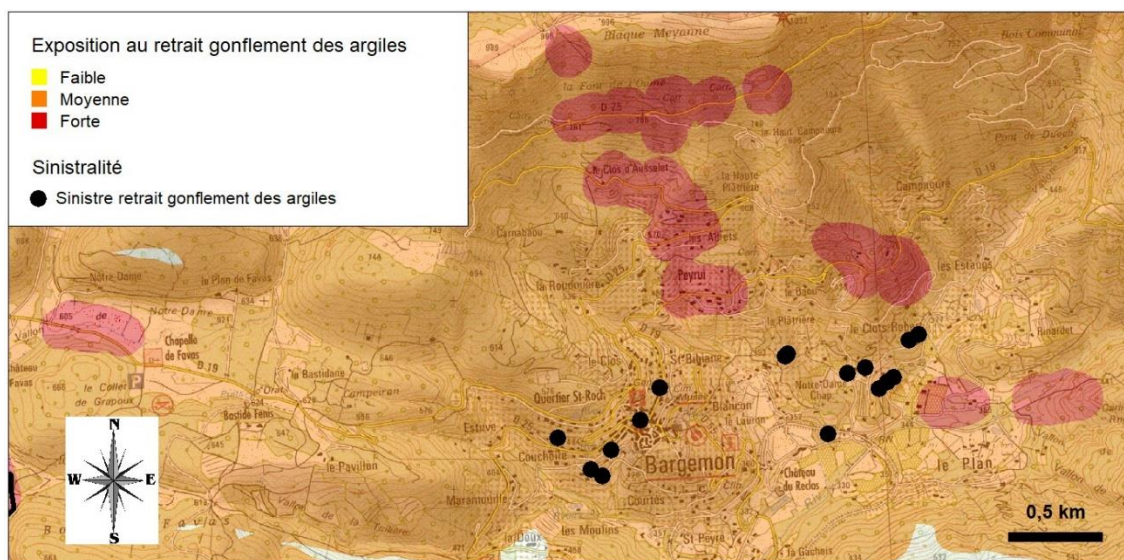
Comme indiqué précédemment, la présence de regroupements de bâtiments endommagés a tendance en première approche préliminaire à laisser penser que les désordres puissent être liés au sol et au sous-sol plutôt qu'aux bâtiments eux-mêmes ou un défaut ponctuel des fondations.

Toutefois, des contextes urbanistiques bien distincts imposent des hypothèses différentes :

- concernant l'axe Marceau-Gabriel Péri : du fait du contexte d'urbanisation ancienne, les dégâts pourraient être liés à des tassements de remblais anciens, accélérés par des éventuelles fuites dans les réseaux d'eau communaux, ou l'entraînement des terrains sous-jacents vers d'éventuels vides anthropiques diffus, par exemple d'anciens réseaux d'égouts dont le tracé serait aujourd'hui méconnu, ou des vides naturels liés à la dissolution du gypse ;
- concernant l'Avenue Pasteur : Ici le contexte d'urbanisation plus récente témoigne donc à niveau d'endommagement égal et pour une durée d'exposition plus courte, d'une moindre résilience du bâti aux mêmes origines que dans le centre ancien et/ou sinon l'implication

d'autres phénomènes en jeu. Effectivement, le contexte de terrassement d'une forte pente perpendiculaire à la rue, ainsi que les désordres observés sur des murs de soutènement, font davantage penser ici à des mécanismes de type glissement de terrain comme hypothèse principale ;

- concernant les dégâts observés dans les zones rurales à l'est de la commune : les dégâts observés, pris de manière isolée, sont tout à fait dans le cadre des manifestations habituelles pour les typologies concernées de maison sans mouvement de terrain avéré associé. Ils sont préoccupants uniquement du fait que l'on observe une légère densification des observations dans l'alignement de la zone de fontis. Si une relation de ce type peut être exclue, tant les pentes que la présence d'argiles gonflantes dans la zone nord-est de Bargemon pourrait aussi expliquer tout à fait ces dommages (Illustration 95). Sur Bargemon, il n'y a eu qu'une seule reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle pour sécheresse au cours de l'été 2017 et sur la zone la plus affectée en termes de dommages (centre bourg), le niveau d'exposition est partout établi à moyen. Concernant les sinistres liés au retrait-gonflement des argiles, ils sont au nombre de 16 sur la commune et les bâtiments déclarés comme sinistrés au retrait-gonflement des argiles n'affectent guère le centre-ville et ils concernent avant tout des maisons pavillonnaires récentes situées en périphérie du village au sud et à l'est (Illustration 96).



Sécheresse : 1

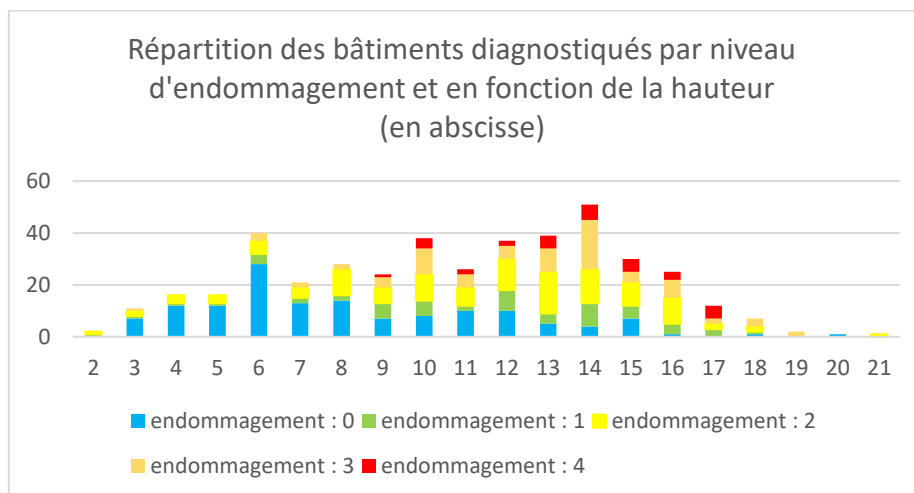
Code national CATNAT	Début le	Fin le	Arrêté du	Sur le Journal Officiel du
INTE1824834A	01/07/2017	30/09/2017	18/09/2018	20/10/2018

Source : CCR

Illustration 95 : Extrait de la cartographie de l'exposition au retrait gonflement argileux à hauteur de la commune de Bargemon (83) avec sinistralité associée et de l'unique reconnaissance CAT NAT pour sécheresse (source : Géorisques).

Aucune corrélation n'a pu être faite au regard de l'hétérogénéité prépondérante des dommages y compris d'un bâtiment voisin à l'autre. Même la hauteur des bâtiments ne semble guère fortement influencer le degré d'endommagement des enjeux bâtis (on aurait pu s'attendre à un

degré moindre d'endommagement maximal pour des bâtiments peu élancés de type pavillonnaire) et il n'en n'est apparemment rien avec le jeu renseigné de données dont on dispose pour ce type de corrélation (428 cas). Les endommagements les plus marqués (respectivement 3 et 4 m) s'observent respectivement dès 3 et 9 m de hauteur. Un des bâtiments les plus hauts (estimé à 20 m) reste sans dommage (Illustration 96).

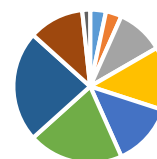


endommagement : 0



■ 2 à 4 m ■ 4 à 6 m ■ 6 à 8 m ■ 8 à 10 m
 ■ 10 à 12 m ■ 12 à 14 m ■ 14 à 16 m ■ 16 à 18 m
 ■ 18 à 20 m ■ 20 à 22 m

endommagement : 1



■ 2 à 4 m ■ 4 à 6 m ■ 6 à 8 m ■ 8 à 10 m
 ■ 10 à 12 m ■ 12 à 14 m ■ 14 à 16 m ■ 16 à 18 m
 ■ 18 à 20 m ■ 20 à 22 m

endommagement : 2



■ 2 à 4 m ■ 4 à 6 m ■ 6 à 8 m ■ 8 à 10 m
 ■ 10 à 12 m ■ 12 à 14 m ■ 14 à 16 m ■ 16 à 18 m
 ■ 18 à 20 m ■ 20 à 22 m

endommagement : 3



■ 2 à 4 m ■ 4 à 6 m ■ 6 à 8 m ■ 8 à 10 m
 ■ 10 à 12 m ■ 12 à 14 m ■ 14 à 16 m ■ 16 à 18 m
 ■ 18 à 20 m ■ 20 à 22 m

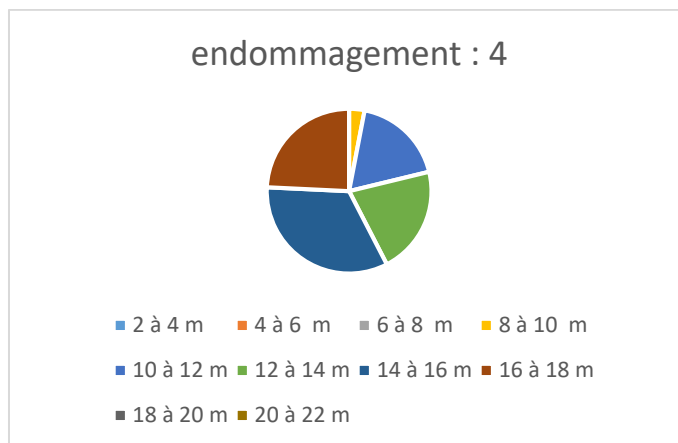


Illustration 96 : Répartition des bâtiments diagnostiqués par niveau d'endommagement et en fonction de la hauteur.

Dans les secteurs où l'endommagement est plus homogène (soit surtout des zones à endommagement limité voire nul), souvent la déformation estimée des versants par approche interférométrique est loin d'être négligeable et c'est plutôt une relation en anti-corrélation entre dommages aux bâtis et intensité interférométrique qui est établie (Illustration 97).

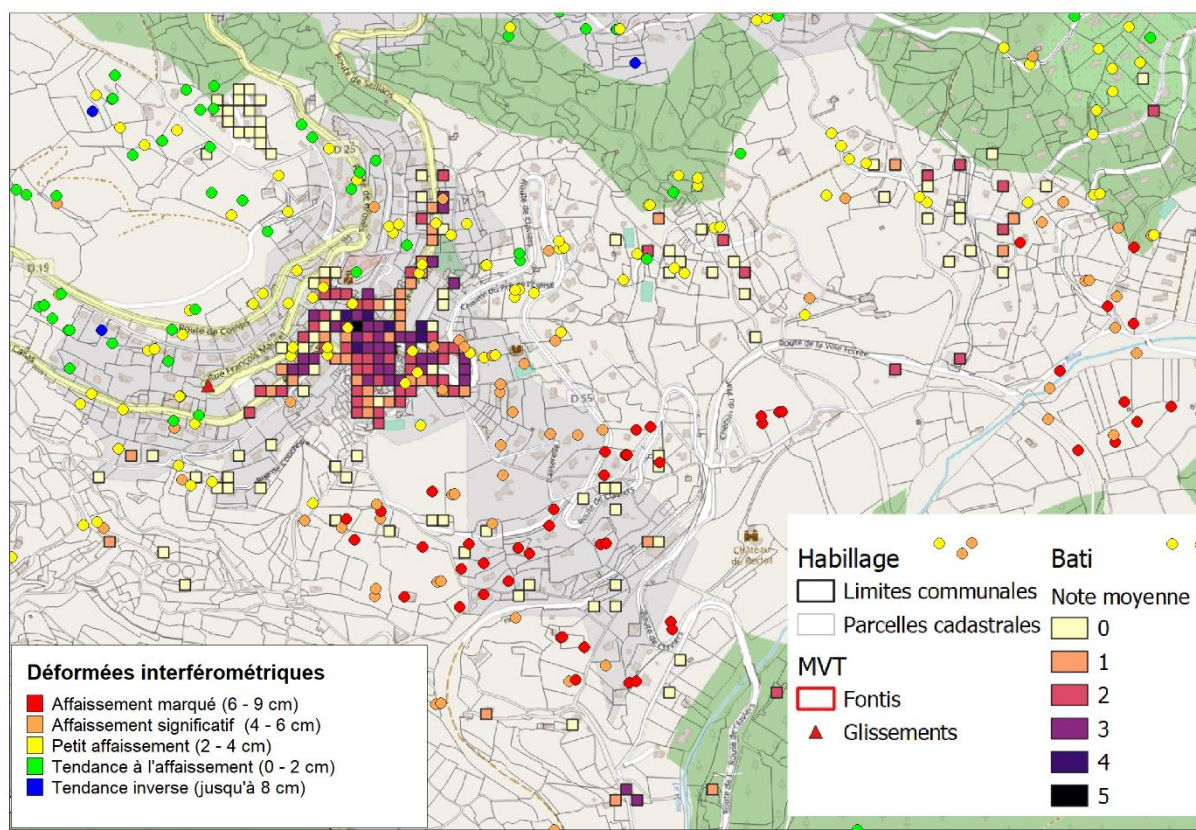


Illustration 97 : Confrontation des déformées interférométriques par rapport aux niveaux d'endommagement.

3.5. IMAGERIE DES FORMATIONS DE SUB-SURFACE PAR MÉTHODES GÉOPHYSIQUES 2-D/3-D

3.5.1. Données existantes

Le travail préparatoire aux investigations géophysiques a permis d'identifier l'existence de nombreuses études géophysiques antérieures. Parmi ces travaux nous retiendrons une étude géophysique multi-méthode (gravimétrie et sondages électriques ; Illustration 98) de Bouvier et Cova (1994²²). Des coupes interprétatives ont été réalisées à partir des sondages électriques, notamment deux, l'une au sud immédiat de l'effondrement et l'autre le long de la RD 19 (Illustration 99). Bouvier et Cova (1994) décrivent : « [des] secteurs à remplissages quasi exclusif d'argiles conductrices, en principe liés aux anomalies résiduelles négatives, des zones pour lesquelles les brèches calcaires et les dolomies en place, plus denses (anomalies résiduelles positives) sont prédominantes et représentent un horizon globalement résistant ». Globalement, ces coupes interprétatives suggèrent une fracturation importante et des décalages verticaux des horizons constituant le sous-sol. Néanmoins, ces résultats issus de l'interpolation de données 1-D ne permettent pas d'établir un schéma structural de la zone.

Une analyse plus fine de la carte gravimétrique est proposée par Pothérat (1997)²³ qui écrit : « La carte des anomalies résiduelles peut être interprétée comme liée à deux directions d'axes légers (anomalies négatives), traduisant un déficit de matière (cavité ou terrain décomprimé) en profondeur, respectivement N10-20 °E et N160-170°E et se coupant au droit de l'effondrement. Le décalage entre les axes légers et l'effondrement lui-même peut être dû à l'attitude (direction, pendage) des failles, légèrement pentées vers l'ouest d'une part et vers le sud-ouest d'autre part.

De fortes anomalies négatives au nord et à l'est de la carte signalent la présence probable d'autres vides (ou de zones décomprimées). »

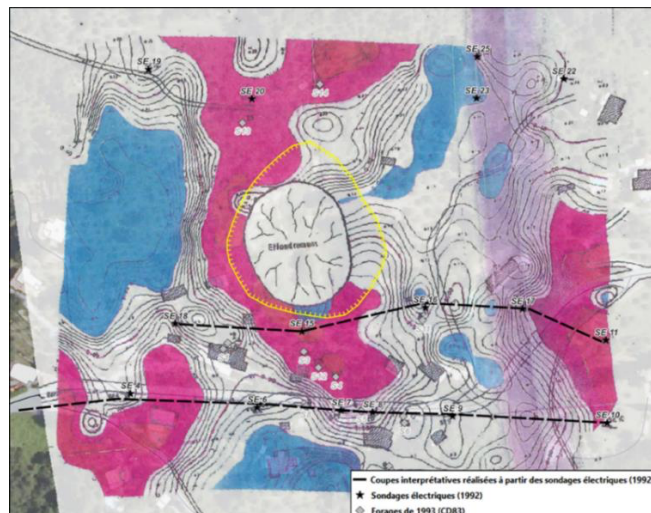


Illustration 98 : Synthèse des études géophysiques existantes. La carte gravimétrique représente en rouge les anomalies positives et en bleu les anomalies négatives (Bouvier et Cova, 1994). Les lignes noires discontinues correspondent aux coupes A et B présentées à l'illustration suivante.

²² Bouvier, A., Cova, R., 1994. Contribution des méthodes géophysiques à la délimitation de zones d'instabilité de terrain liées à une dissolution de gypse. Géologues (Paris) 47–59

²³ Pothérat, P., 1997. Etude par photo-interprétation des phénomènes d'effondrement liés à la dissolution du gypse. Bull. DES PONTS CHAUSSEES 69–82

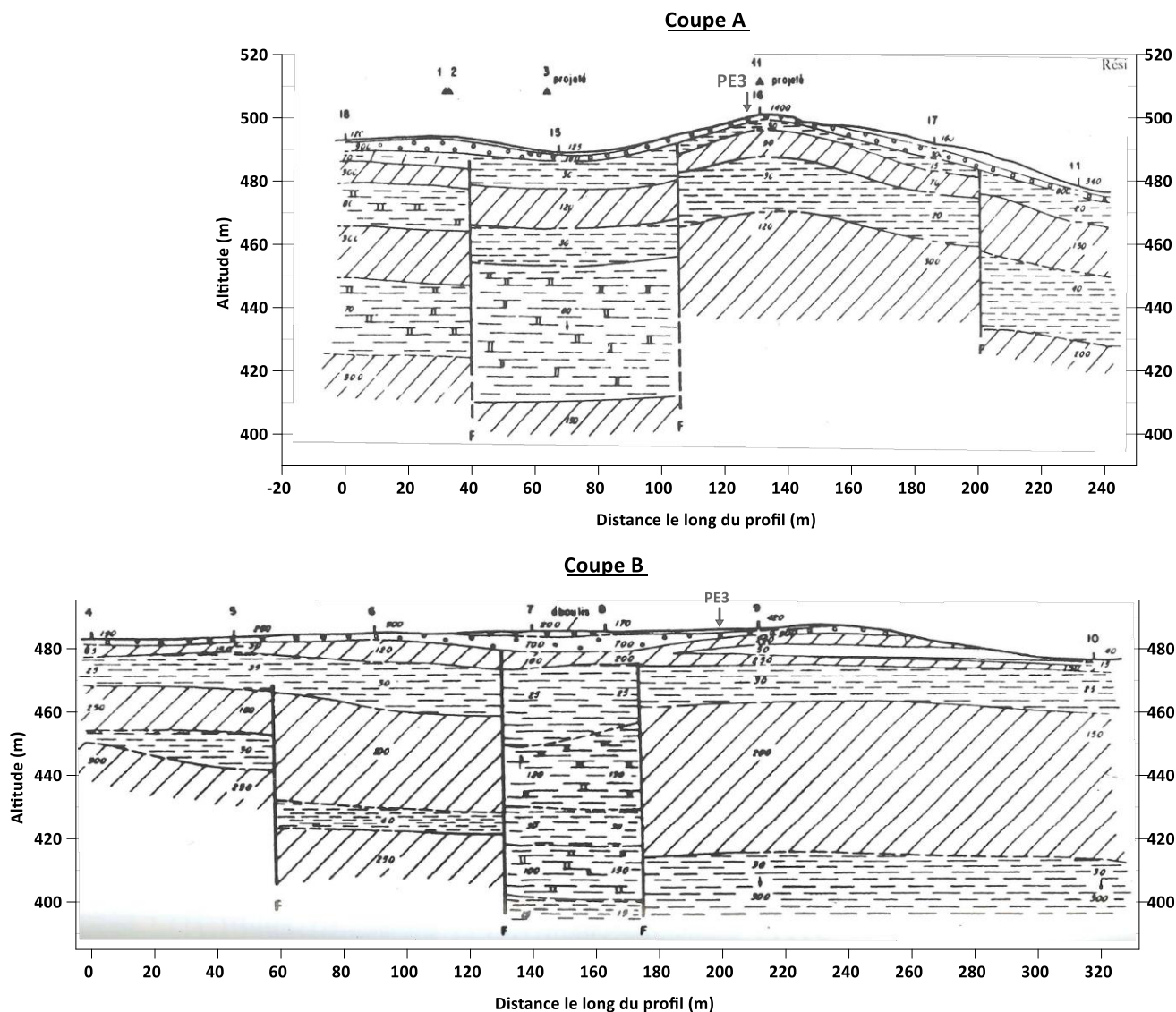


Illustration 99 : Coupes interprétatives réalisées à partir de sondages électriques (Bouvier et Cova, 1994). Les valeurs de résistivité sont indiquées dans les horizons.

Ces données géophysiques montrent que les terrains présents autour de l'effondrement du Peyrui sont caractérisés par des contrastes de paramètres physiques, notamment de résistivité. La géophysique, déjà mise en œuvre dans les années 90, constitue donc un outil pertinent pour l'apport d'informations en profondeur.

3.5.2. Choix des méthodes

Deux méthodes d'imagerie géophysique proche surface ont été mises en œuvre dans le cadre de ce projet : la Tomographie de Résistivité Electrique (TRE) et l'imagerie sismique.

La TRE vise à caractériser la distribution 2D (i.e. en profondeur, le long d'un linéaire) des résistivités électriques dans le sous-sol le long du profil d'acquisition. Il s'agit d'une méthode non invasive, non destructive. Cette méthode renseigne sur la nature et la géométrie des terrains auscultés et peut fournir des contraintes sur leur état (altération, saturation...). Une présentation détaillée de la méthode est décrite en Annexe 4.

L'imagerie sismique active est l'étude de la propagation, dans le sous-sol, d'ondes sismiques générées artificiellement à la surface du sol. Cette méthode est non invasive et non destructive. Selon la méthode employée, elle renseigne sur la géométrie et la nature des formations géologiques rencontrées, et sur la variation des paramètres géomécaniques des terrains auscultés. Deux méthodes d'imagerie sismique ont été utilisées dans le cadre de cette étude : l'imagerie sismique en ondes de surface – MASW – et l'imagerie sismique réfraction. Une présentation détaillée de l'imagerie sismique en générale, et de ces deux méthodes en particulier, est décrite en Annexe 5.

3.5.3. Réalisation

a) Tomographie de Résistivité Electrique

▪ Enjeux

La TRE a été utilisée dans deux zones distinctes.

Dans le secteur du Plan d'une part, un profil TRE (PE1) a été mis en œuvre afin (i) de contraindre l'architecture du bâti géologique dans ce secteur où l'interférométrie indique des mouvements importants (les plus importants de la zone auscultée et (ii) d'obtenir la signature géoélectrique des différentes formations du Trias en particulier les niveaux gypsifères.

Dans le secteur du Peyrui d'autre part, deux dispositifs orthogonaux ont été déployés au nord et à l'est de l'effondrement. L'objectif était de contraindre le contexte stratigraphique (relations entre les formations superficielles et les terrains du Trias) et structural à proximité immédiate de l'effondrement. Pour cela, des profils d'espacement inter-électrode de 5 m ont été sélectionnés (profondeur maximale d'investigation : 75 m). La réalisation de deux profils perpendiculaires a été motivée par la présence d'un réseau de failles/fracturation, d'orientation N20, identifié au NE de l'effondrement (PE2 positionné perpendiculairement à cet axe), ainsi qu'une orientation N110 des grandes anomalies structurales (e.g. plis, PE3 positionné perpendiculairement à cet axe).

▪ Acquisitions

Les données TRE ont été acquises du 9 au 13 mars 2020 par trois agents du BRGM. Trois profils ont été déployés (Illustration 100) : un profil situé au pied du village de Bargemon (PE1) et deux profils autour de l'effondrement du Peyrui (PE2 et PE3).

Nom	Localité	Orientation	Date acquisition	Intertrace	Longueur (m)	Dispositif	Données retenues après filtrages
PE1	Le Plan	ESE-ONO	10/03/2020	10 m	945,75	WSR	96 %
						DD	94 %
PE2	Le Peyrui	O-E	11/03/2020	5 m	395	WSR	96 %
						DD	97 %
PE3	Le Peyrui	N-S	12/03/2020	5 m	345	WSR	73 %
						DD	68 %

Illustration 100 : Caractéristiques techniques et statistiques post-traitement des profils TRE.

Le profil PE1 se composait de 96 électrodes métalliques, espacées de 10 m (ligne rouge, Illustration 101). Les profils PE2 et PE3 étaient composés de 80 et 70 électrodes respectivement (lignes orange,). En TRE, un profil complet contient 96 électrodes : les profils PE2 et PE3 n'ont

pu être réalisés selon cette configuration à cause d'obstacles naturels (ravines) ou anthropiques (ancien lotissement urbanisé) n'ayant pas pu permettre l'implantation d'électrodes supplémentaires.

Les mesures TRE ont été acquises avec un résistivimètre SYSCAL PRO (Iris Instrument, Illustration 101). De l'eau saturée en sel a été utilisée afin d'optimiser le contact électrique entre les électrodes et le sol. Les résistances de prises mesurées étaient comprises entre 0,14 et 0,6 kOhm.

Pour chaque profil, les acquisitions ont été réalisées suivant deux protocoles d'acquisition complémentaires (voir Annexe 4 pour plus détail sur les protocoles) :

- le dipôle-dipôle (DD) qui offre une bonne résolution des niveaux superficiels et permet de bien résoudre les variations latérales de résistivité ;
- le Wenner-Schlumberger réciproque (WSR²⁴) qui est sensible aux variations verticales de résistivité et permet ainsi de bien identifier les niveaux géologiques horizontaux. Il s'avère toutefois plus sensible aux effets latéraux (de part et d'autre de la ligne de mesure) et la résolution des niveaux de subsurface est moins bonne.



Illustration 101 : Photo du résistivimètre lors de l'acquisition le long de PE2.

Les profils ont été positionnés au GPS différentiel Trimble Géo7x. Les données GPS brutes ont ensuite été post traitées avec le logiciel GPS Pathfinder Office v.5.85 grâce aux éphémérides enregistrées à la station FAYE du Réseau GNSS Permanent située à Fayence (à environ 15 km de la zone d'étude).

■ Traitements

Les données de résistivités brutes ont été traitées à l'aide du logiciel PROSYS II (V03.13.06, Iris Instrument). Un premier filtrage (filtrage I) a été appliqué selon les paramètres suivants (recommandations de l'AGAP Qualité²⁵, 1992) :

- différence de potentiel minimale de réception $V_{\min} \geq 0,1 \text{ mV}$;
- intensité minimal du courant d'injection $I_{\min} \geq 20 \text{ mA}$;
- écart-type sur la mesure $Q \leq 5 \%$.

Les points de données dits « aberrants », c'est-à-dire dont les valeurs s'écartent très nettement de la tendance globale pour un même niveau de mesure, ont été éliminés manuellement (filtrage qualitatif). Les données ont ensuite fait l'objet d'un traitement complémentaire (filtrage II, Annexe 4), par médiane glissante, grâce au logiciel X2IPI (Annexe 4). Ce filtrage consiste à éliminer le bruit des inhomogénéités lithologiques superficielles qui peuvent affecter les données. Les données des profils PE1 et PE2 sont d'excellente qualité (taux de données retenues après filtrage

²⁴ Voir détail sur ce dispositif en Annexe 4.

²⁵ AGAP Qualité : association ayant rédigé un code de bonne pratique des méthodes de géophysique appliquée en termes de qualité du service rendu au client (<https://www.agapqualite.org/>).

supérieur à 94 %, Illustration 102). Les données du profil PE3 sont de qualité moyenne (73 % de données conservées pour le protocole WSR, 68 % pour le DD). Ces statistiques peuvent s'expliquer par la présence, dans la partie sud du profil, sur environ 120 m, d'une forte anthropisation des terrains (zone de lotissement). L'absence de certaines électrodes dans cette zone ainsi que la présence de structures perturbatrices des mesures TRE (dalles en béton armée, réseaux souterrains...) ont entraîné la suppression de nombreux points de mesures lors du filtrage (voir détail en Annexe 4).

Après filtrage, l'altitude des électrodes (levé GPS) a été intégrée aux données de résistivité. Les jeux de données résultants ont ensuite été inversés grâce au logiciel RES2DINV (v.4.10.3). Au regard des forts contrastes de résistivité attendus et de la géométrie connue du bâti géologique (niveaux sub-tabulaires et accidents structuraux sub-verticaux), des inversions de type « robuste » anisotrope ont été privilégiées (Loke, 2020). Les paramètres détaillés des inversions sont présentés en Annexe 4.

b) Imagerie sismique

▪ *Enjeux*

Trois types d'acquisitions sismiques ont été utilisés, chaque méthode ayant un objectif précis à atteindre :

- un profil d'imagerie sismique réflexion/réfraction, nommé PS1, dont le but était de contraindre les formations géologiques présentes sous le village et plus précisément la présence et les caractéristiques des formations superficielles et l'interface Lias-Trias. Ce profil a été réalisé le long de la route départementale 19 (rue Jean Jaurès) avec une distance de 5 m entre capteurs ;
- une série de profils MASW²⁶ (P1 à P12) afin de contraindre les terrains très superficiels dans le cœur du village et notamment les épaisseurs de remblais et d'éventuels désordres très proche surface. Deux dispositifs ont été employés : un dispositif dont les capteurs étaient espacés de 0,5 m dans le cœur du village (rues courtes, profondeur d'investigation jusqu'à 10 m) et un autre d'espacement 2,0 m autour du centre du village (profondeur d'investigation jusqu'à 25 m) ;
- une tomographie sismique 3D à l'échelle du bourg, afin de contraindre le contexte géologique et surtout stratigraphique sous le village, jusqu'à une profondeur d'environ 200 m.

²⁶ MASW : *Multiple Analysis of Surface Waves*, sismique en ondes de surface (voir Annexe 6)

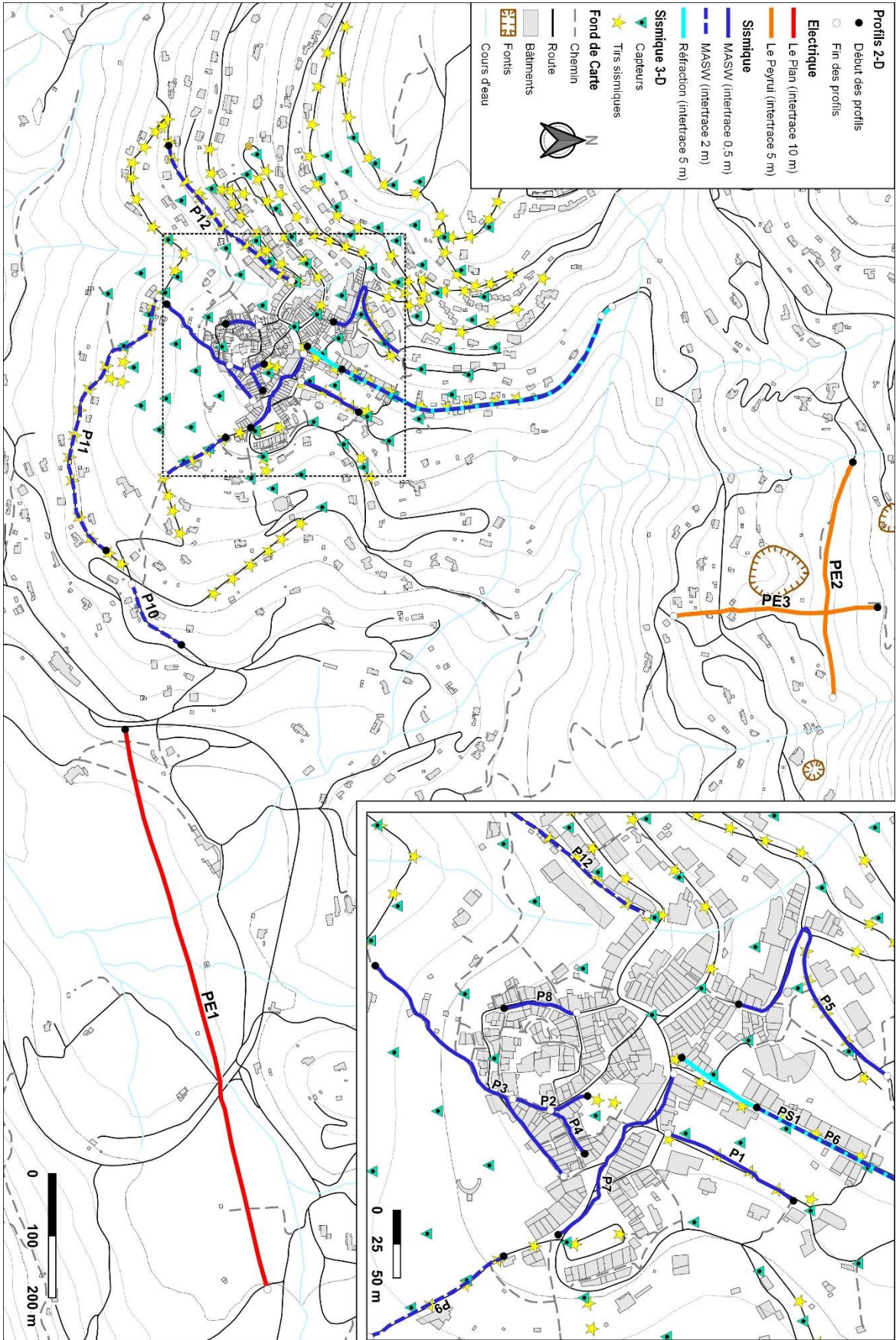


Illustration 102 : Carte de localisation des acquisitions géophysiques.

■ Acquisitions

Les acquisitions sismiques ont été réalisées du 2 au 12 juin 2020 par trois agents du BRGM accompagné d'un collaborateur stagiaire du BRGM. Les détails des profils sismiques 2-D sont présentés dans l'illustration 103.

Profil	Méthode	Intertrace	Rue	Longueur	Orientation
PS1	Réfraction	5 m	Rue Jean Jaurès – D19	595 m	S-N
P1	MASW	0,5 m	Place Saint-Etienne	107 m	NE-SO
P2			Rue Gabriel Péri > Rue de la Prison	59 m	N-S
P3			Rue du sous Barry > Rue du Vieux Château	216 m	SO-NE
P4			Rue de la Prison	42 m	NE-SO
P5			Rue Marceau > Le Clos	224 m	SO-NE SE-N
P7			Rue de la Résistance>Place Moreri>Ch. de Coucadis	160 m	SE-NO
P8			Rue du Dr Anthelmi	56 m	S-N
P6		2 m	Rue Jean Jaurès – D19	509 m	S-N
P9			Chemin de Coucadis	117 m	NO-SE
P10			Traverse du Lauron	133 m	NE-SO
P11			Chemin de la Ferrage	487 m	O-E
P12			Rue de Couchoire	302 m	SO-NE

Illustration 103 : Caractéristiques des profils sismiques 2-D.

L'acquisition du profil sismique réfraction (PS1, ligne turquoise, Illustration 102) a été réalisée à l'aide d'une centrale d'acquisition sismique Stratavisor 48 traces et 3 Geodes 24 traces (Geometrics, USA) connectées à 5 flûtes de 24 traces, pour un total de 120 géophones (10 Hz, Illustration 104a) régulièrement espacées de 5 mètres sur 595 m. La source sismique était de type chute de poids accélérée A-200 (Illustration 104c). L'espacement entre les points de tir sismiques était de 10 m.

Les acquisitions MASW ont été réalisées grâce à un dispositif tractable (Illustration 104d) composé de 24 géophones (10 Hz, Gimbal)) fixés à un câble lui-même relié à un ordinateur portable via une géode 24 traces (Geometrics, USA). Les acquisitions ont été réalisées avec des espacements entre géophones de 0,5 m (lignes bleues discontinues, Illustration 102) et de 2 m (lignes bleues continues, Illustration 102). Les tirs sismiques ont été effectués à la double-masse tous les 4 m.

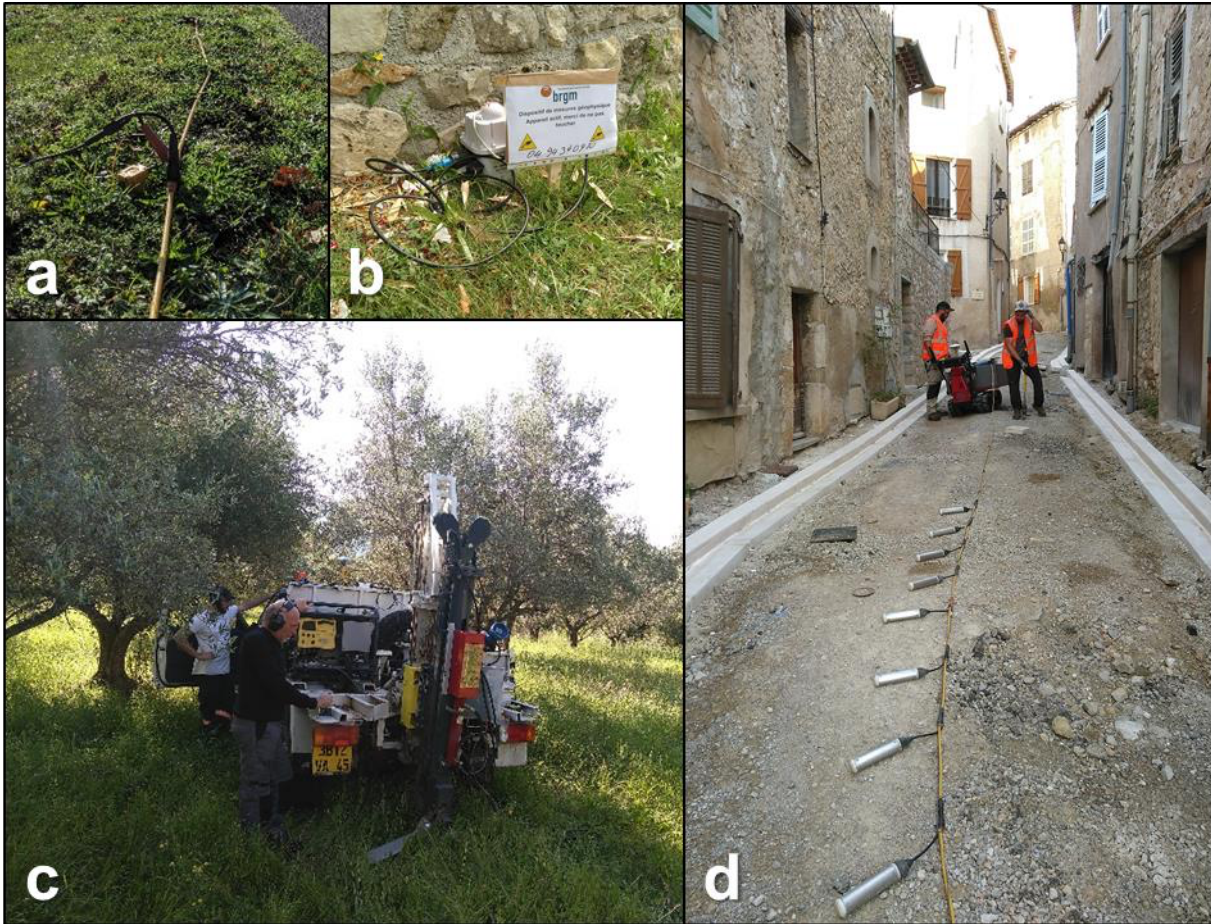


Illustration 104 : Photos des instruments sismiques. a) Géophone 10 Hz utilisé pour l'acquisition sismique réfraction de PS1. b) Capteur RAU utilisés pour l'acquisitions sismique 3-D. c) Source sismique A-200. d) Dispositif d'acquisition MASW utilisé dans le centre de Bargemon (ici espacement entre capteurs de 0,5 m et opérateur au tir manuel à la double-masse).

L'acquisition sismique 3-D a été réalisée grâce à l'implantation de 83 capteurs sans fil (aussi appelés RAU²⁷, Sercel, Illustration 104b) selon une maille quasi-régulière de 50 à 70 m entre capteurs (triangles sur Illustration 102). 149 tirs sismiques ont été réalisés à la source sismique A-200 (étoiles jaunes, Illustration 102).

Les profils 2-D ainsi que les capteurs et tirs sismiques de l'acquisition 3-D ont été positionnés au GPS différentiel Trimble Géo7x. Les données GPS brutes ont ensuite été post traitées avec le logiciel GPS Pathfinder Office v.5.85. Grâce aux éphémérides enregistrées à la station FAYE du Réseau GNSS Permanent située à Fayence (à environ 15 km de la zone d'étude).

■ *Traitements*

Les traitements des données sismiques réfraction (PS1), sismique MASW (P1 à P12) et sismique 3-D sont détaillés en Annexe 5. Les données acquises en configuration MASW sont de qualité moyenne à bonne.

²⁷ Remote Autonomous Units.

3.5.4. Résultats et interprétation

a) Imagerie électrique

Les coupes de distribution des résistivités électriques brutes obtenues après inversion pour chacun des dispositifs sont présentées en Annexe 4. Pour chaque profil, les résultats obtenus sont cohérents d'un dispositif à l'autre (dipôle-dipôle vs Wenner-Schlumberger réciproque). La plus grande profondeur d'investigation atteinte par le dispositif Wenner-Schlumberger réciproque nous a conduit à réaliser les interprétations présentées ci-après sur les coupes de résistivité correspondantes à ce dispositif pour chaque profil.

■ Description générale des unités géoélectriques identifiées

Les coupes de résistivités électriques des profils PE1 (Illustration 105), PE2 (Illustration 106 haut) et PE3 (Illustration 106 bas) sont présentées avec une échelle de résistivité identique.

Globalement cinq unités géoélectriques distinctes sont identifiées.

- l'unité C0 ($50 < \rho^{28} < 100$ ohm.m) et l'unité R0 ($\rho > 150$ ohm.m) sur le profil PE1 uniquement, sur une épaisseur de 5 à 10 m. Ces deux unités sont associées aux formations superficielles (alluvions du Quaternaire) et ne feront pas l'objet d'une analyse détaillée ;
- l'unité C1 ($30 < \rho < 80$ ohm.m) et la sous-unité associée C1' ($\rho < 30$ ohm.m) ;
- l'unité R1 ($\rho > 150$ ohm.m) et la sous-unité associée R1' ($80 < \rho < 150$ ohm.m) ;
- l'unité R2 ($\rho > 250$ ohm.m) et les sous-unités associées R2' ($150 < \rho < 200$ ohm.m) et R2'' ($100 < \rho < 150$ ohm.m).

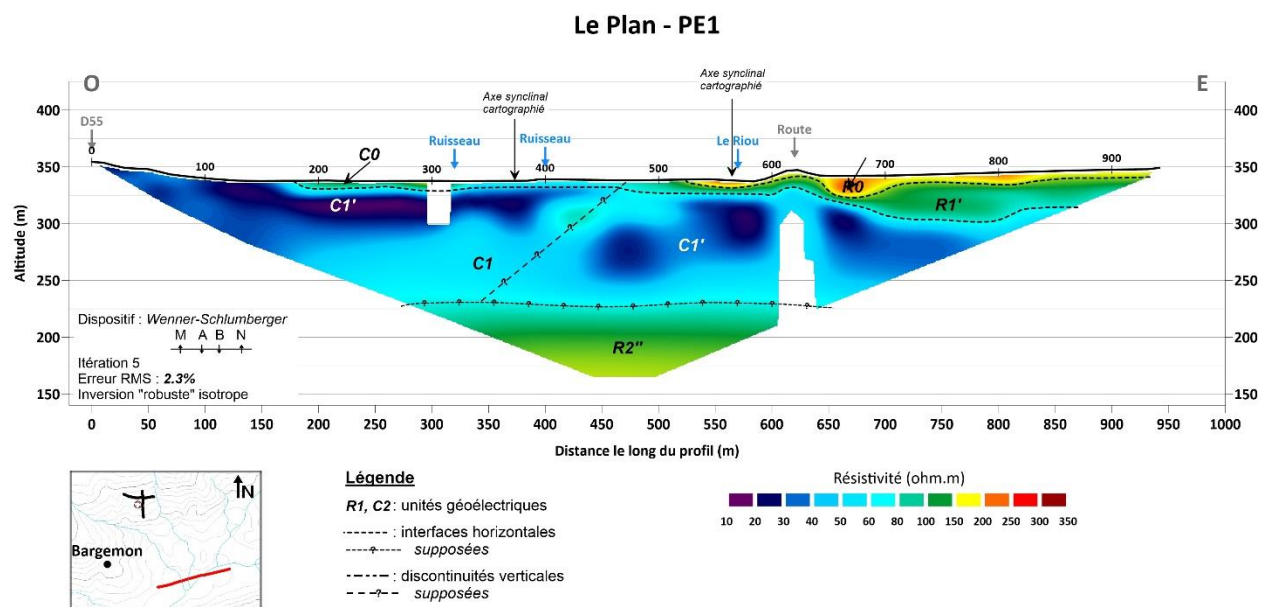


Illustration 105 : Le Plan - Profil PE1 – Coupe de distribution des résistivités électriques interprétées.

²⁸ ρ : symbole de la résistivité électrique utilisée comme abréviation dans la suite de ce rapport.

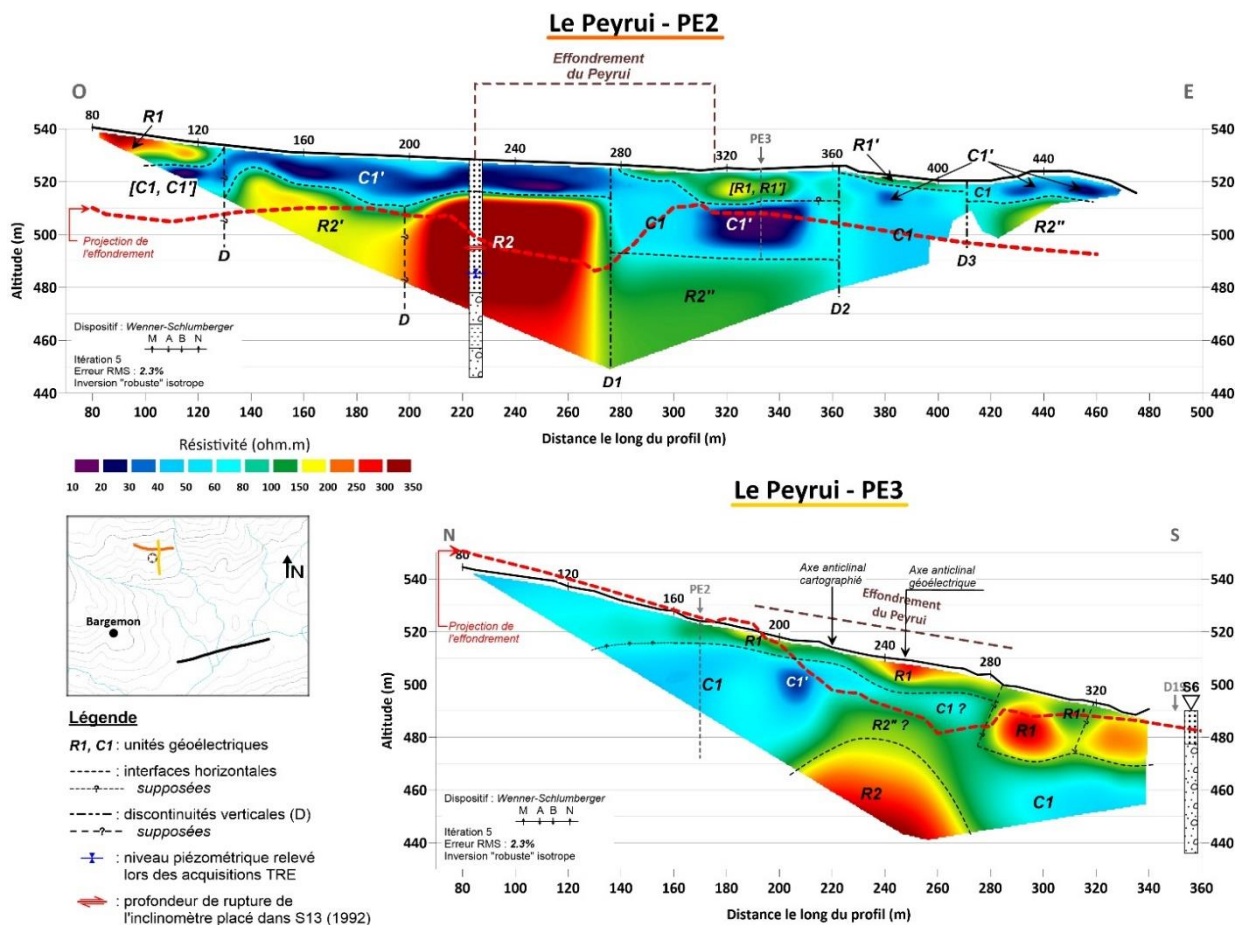


Illustration 106 : Le Peyrui - Profils PE2 (haut) et PE3 (bas) – Coupe de distribution des résistivités électriques.

Interprétation géologique

L'interprétation des coupes TRE a donc été réalisée sur la base des éléments de la synthèse géologique réalisée au cours de cette étude (connaissances anciennes et nouvelles).

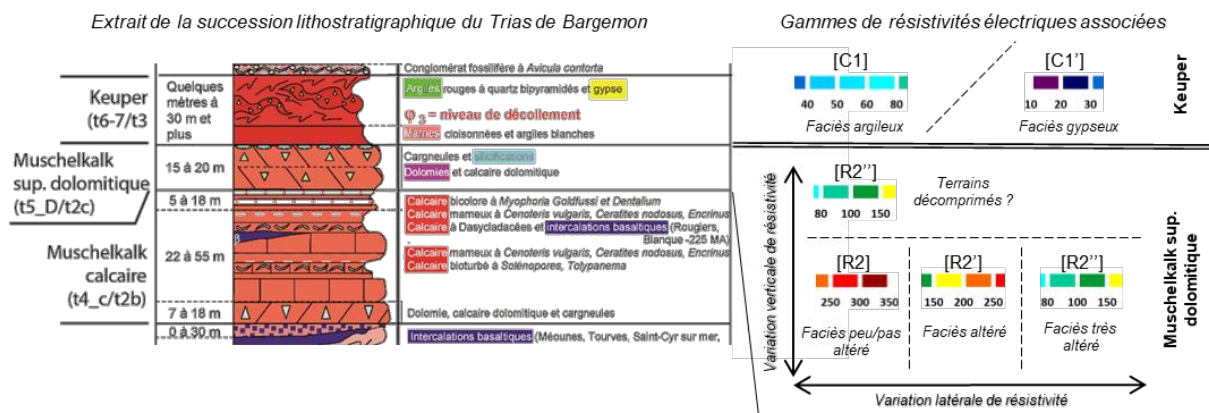


Illustration 107 : Proposition d'interprétation des gammes de résistivité électrique observées en termes d'unité lithostratigraphique et d'altération (voir succession lithostratigraphique complète à l'illustration 28).

D'après les connaissances sur la géologie locale (Illustration 107 gauche), les horizons conducteurs C1 et C1' sont interprétés comme les formations du Keuper. Ces formations sont caractérisées par des argiles, des argiles gypseuses et du gypse (voir résultats des forages en Annexe 8). L'horizon C1 est interprété comme un faciès plutôt argileux du Keuper et C1' comme un faciès plutôt gypseux. Le niveau résistant R2 est attribué aux formations du Muschelkalk supérieur dolomitique. L'horizon très résistant R2 correspondrait à un faciès peu/pas altéré (dolomies et calcaire dolomitique).

Le long du profil PE2, les horizons R2' et R2'' sont interprétés comme des faciès altérés à très altérés respectivement de la partie supérieure du Muschelkalk supérieur (cargneules et silicification). Les variations latérales de résistivité observées ici sont associées à des variations de faciès. Notons que l'interface entre C1' et l'ensemble [R2, R2' et R2''] est très net. Cette interface est considérée comme le contact normal entre les formations du Keuper et celles du Muschelkalk sous-jacent. Sur le profil PE3, ce contact est plus progressif. Il est caractérisé par la présence d'un horizon R2'' entre les formations attribuées au Keuper (C1, C1') et celles attribuées au Muschelkalk (R2). Ce contact plus progressif pourrait indiquer la présence de terrains décomprimés au toit du Muschelkalk en lien avec l'effondrement du Peyrui.

Dans le secteur du Plan, les terrains superficiels C0 et R0 sont interprétés comme des alluvions quaternaires saturées et non saturées respectivement (Illustration 108). Au niveau du Peyrui, le résistant superficiel R1 présent à l'extrémité ouest de PE2 pourrait correspondre à des dépôts de versant (éboulis, Illustration 109).

Cette proposition d'interprétation des horizons électriques permet un habillage des coupes de résistivité tel que présenté aux Illustration 108 (secteur du Plan) et Illustration 109 (secteur du Peyrui).

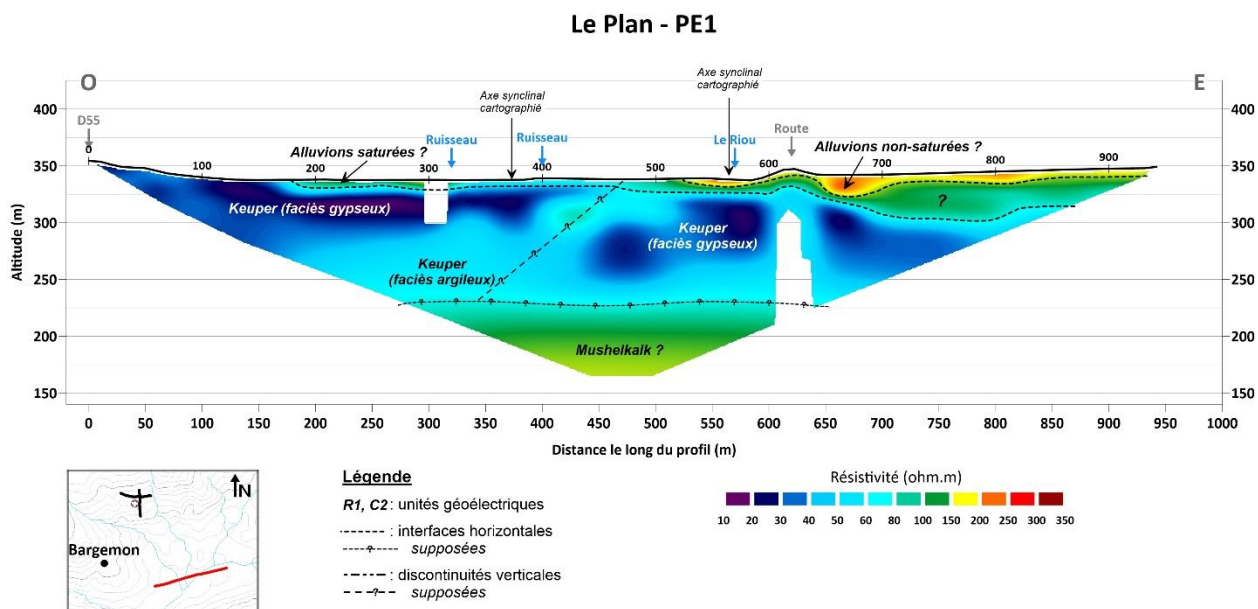


Illustration 108 : Le Plan - Profil PE1 – Coupe de distribution des résistivités électriques interprétée.

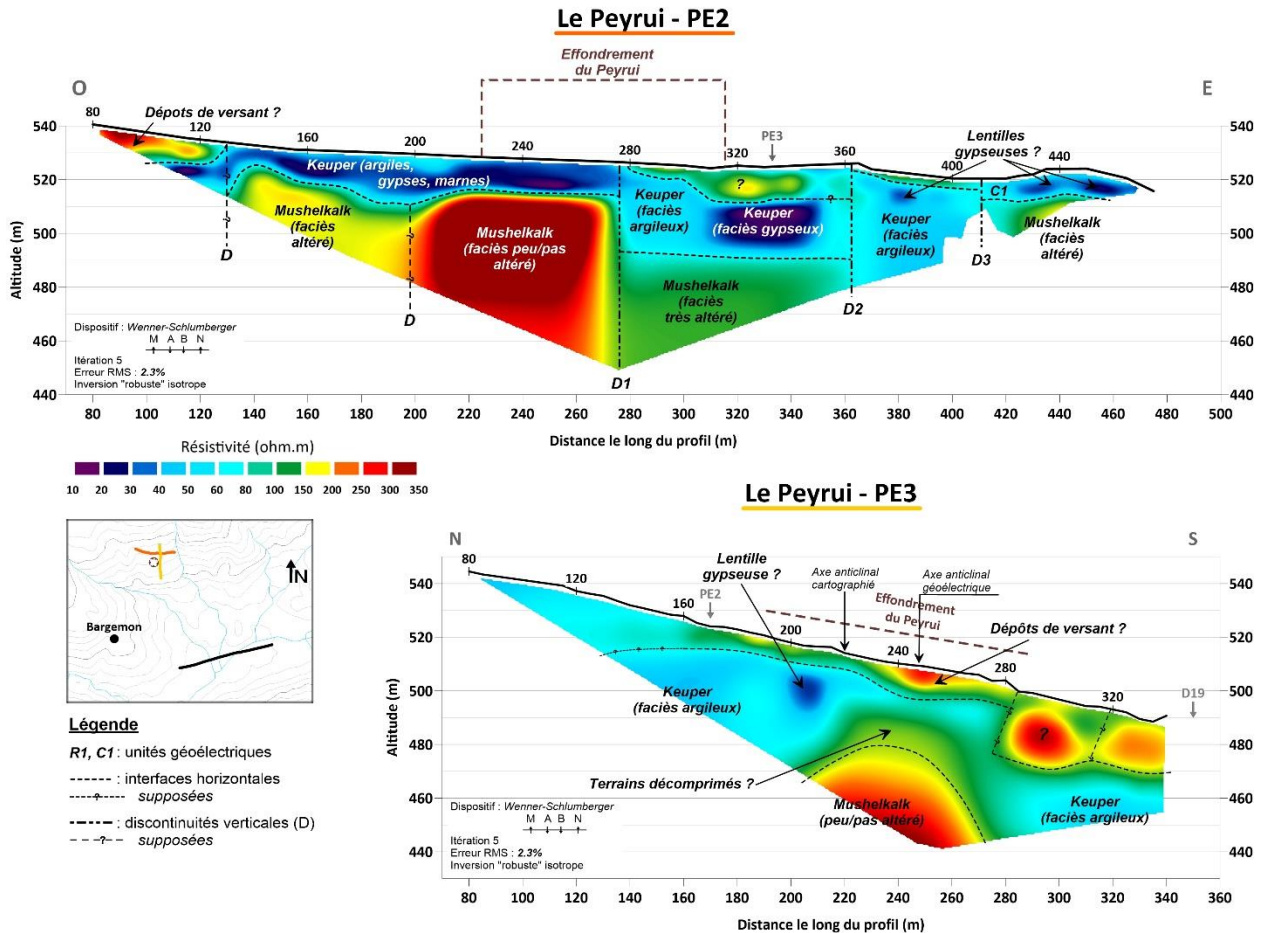


Illustration 109 : Le Peyrui - Profils PE2 (haut) et PE3 (bas) – Coupes de distribution des résistivités électriques interprétées.

■ Interprétation structurale

Sur les trois coupes de résistivité, des discontinuités verticales sont identifiées. Notées D, elles correspondent à des variations latérales de résistivité franches et marquées. Dans le contexte géologique de la zone d'étude, ces discontinuités sont interprétées comme des failles/fractures.

● Zone du Plan

Le long du profil PE1, une discontinuité verticale est supposée au sein de l'horizon [C1-C1'] (Illustration 108). Elle découpe l'horizon très conducteur C1' en deux. A l'ouest de cette discontinuité, C1' est en position sub-affleurante. Le mur de C1' forme un biseau en remontant à l'approche de la discontinuité supposée. A l'est de cette dernière, l'horizon C1' forme un niveau continu de géométrie constante (environ 50-60 m d'épaisseur) (*l'absence de données au droit de la route crée une discontinuité verticale considérée comme un artefact et non prise en compte dans l'analyse*). La localisation, en surface, de cette discontinuité, concorde avec la présence, à proximité, (1) de l'axe d'un pli synclinal (pointillé noir), (2) d'une faille/fracture N45 (turquoise) et (3) d'une faille supposée N20-30 (pointillé rouge) (Illustration 110). Une origine structurale de cette discontinuité semble avérée bien qu'il ne soit pas possible d'aller plus loin dans l'analyse par manque de données complémentaires.

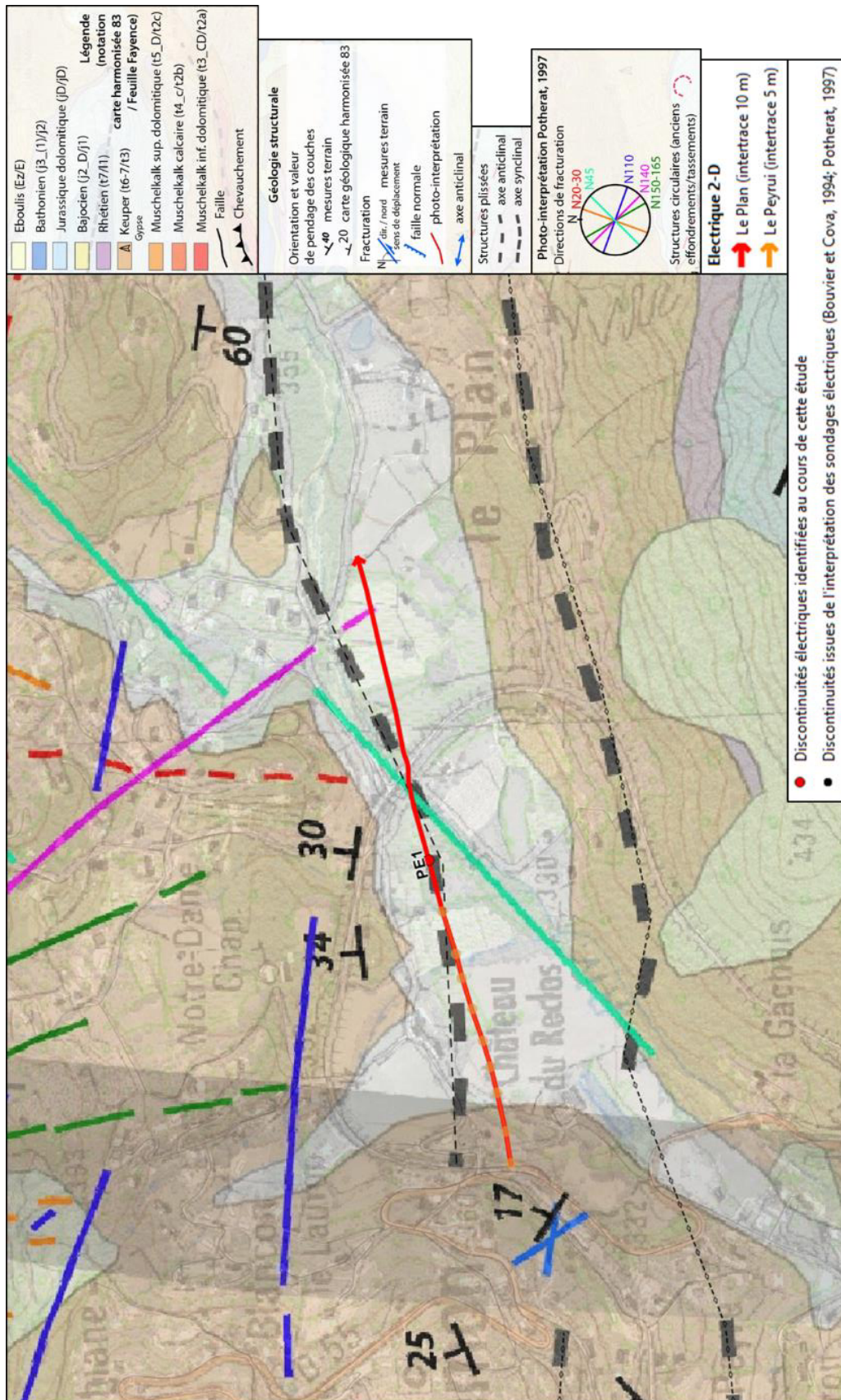


Illustration 110 : Secteur du Plan – Position du profil PE1 et de la discontinuité verticale observées sur la coupe sur la carte géologique et structurale de la zone.

- Zone du Peyrui

Les profils autour de l'effondrement du Peyrui apportent des précisions sur le contexte structural de la zone.

Sur le profil PE3, le résistivité R2 a une géométrie « en cloche ». Son axe, projeté à la surface, se situe à environ 245 m d'abscisse le long du dispositif (Illustration 109 bas) ; il est localisé à environ 30 m au sud de l'axe cartographié d'un pli anticlinal. Le résistivité R2 est ainsi interprété comme la signature d'un pli anticlinal. Sur le profil PE2 (haut), le résistivité R2 représenterait le cœur du pli. La bordure est de R2 est marquée par une discontinuité majeure notée D1 (à 275 m d'abscisse). L'axe du résistivité R2 est décalé vers le sud à la faveur de la discontinuité D1. Il est également décalé verticalement d'au moins 20 m entre sa position à l'ouest de D1 (sur PE2), et sa position à l'est (sur PE3).

Une représentation 3-D de ces résultats offre une vision plus précise des structures géo électriques autour de l'effondrement du Peyrui (Illustration 111). Selon nos interprétations, la géologie de cette zone se traduit par la présence d'un pli anticlinal d'orientation N110°. Ce pli serait recoupé par une faille normale à regard est, orientée N10°-20° et à décrochement dextre. Le rejet vertical est d'au moins 20 m. La présence de ce pli semble entrainer une accumulation des formations [C1, C1'] sur son flanc nord (Illustration 109 bas).

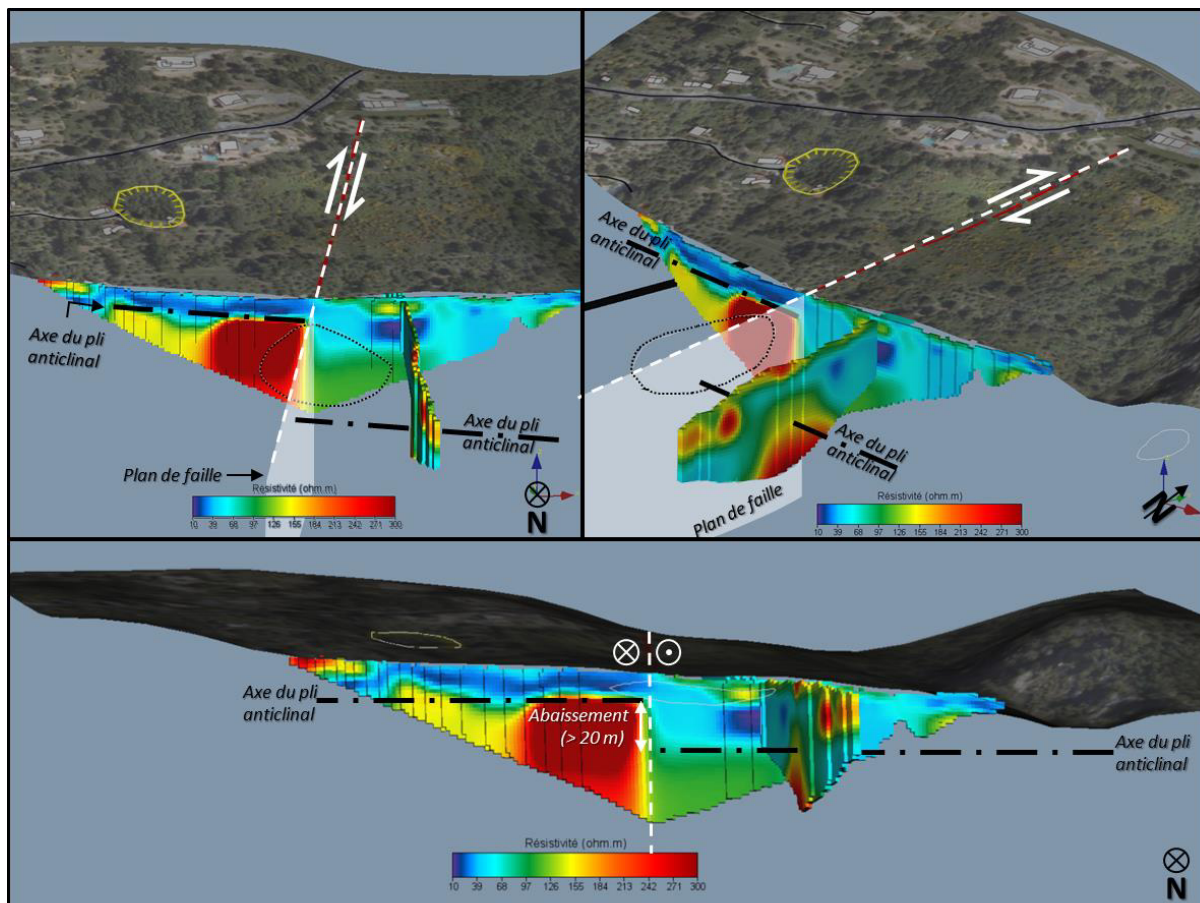


Illustration 111 : Secteur du Peyrui – Vue 3-D des coupes de résistivité des profils PE2 et PE3 et interprétation structurale.

D'autres discontinuités verticales sont identifiées sur PE2 (Illustration 100 haut) :

- D2, à l'abscisse 362 m est caractérisée par un rejet d'environ 10 m. Cette discontinuité est interprétée comme une faille inverse à regard ouest ;
- D3, à l'abscisse 410m, qui présente un rejet moindre d'environ 5 m. Cette discontinuité est interprétée comme une faille normale à regard est ;
- deux autres discontinuités sont supposées aux abscisses 130 m et 200 m.

▪ *Apport de l'imagerie électrique à l'étude*

L'imagerie électrique a permis de confirmer et clarifier le contexte géologique et structural à l'origine de l'effondrement du Peyrui : une accumulation de gypse liée à l'anticlinal associée à une fracturation des terrains susceptibles de constituer des drains favorisant l'infiltration d'eau. L'identification de ce contexte favorable à la formation d'effondrements contribue à l'évaluation globale du risque réalisée dans la suite de cette étude.

b) Imagerie sismique

Le modèle sismique 3-D est présenté en détail dans l'Annexe 5 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** Ce modèle est cohérent avec les données obtenues le long du profil de la RD19 et apporte des informations sur la géométrie globale des terrains auscultés, notamment la forte ondulation du toit des formations massives du Muschelkalk sup. (dolomies et calcaires dolomitiques) sur lesquelles reposent les formations gypsifères du Keuper.

Une exploitation plus optimale de ce modèle 3-D aurait nécessité la réalisation d'un voire plusieurs sondages carottés profonds. Or, et à l'exception du modèle sismique 3-D, l'ensemble des données synthétisées et acquises lors de cette étude ont motivés la réalisation de deux sondages carottés de 20 m de profondeur afin d'obtenir les informations indispensables à la finalisation de l'étude.

▪ *Les formations superficielles du cœur de village (sismique MASW)*

• *Comparaison des Vs avec les données de forages*

Les profils sismiques MASW fournissent des coupes 2-D de la distribution des ondes cisailantes Vs. La profondeur d'investigation est de l'ordre de 5 m pour les profils PS1, PS2, PS3, Ps4, Ps5, PS7 et PS8 (distance entre capteurs de 0,5 m) et d'environ 15 m sur les profils PS6, PS9, PS1, PS11 et PS12 (distance entre capteurs de 2 m).

Les coupes Vs sont présentées en détail en . Elles sont dans l'ensemble homogènes et cohérentes. Globalement, des terrains à Vs < 100 m/s sont quasi-systématiquement observés sur environ 10 m. En surface, des terrains très lents, Vs < 200 m/s, occupent les 2 à 3 premiers mètres. Aucune anomalie significative particulière n'est observée sur les coupes de Vs.

Ces résultats ont été mis en vis-à-vis des données issues des deux sondages carottés réalisés lors de cette étude (Illustrations 112 et 113 et rapport en Annexe 8 des forage). Aucun lien direct entre les vitesses Vs et la lithologie des terrains ne peut être établi. Une interprétation lithologique des résultats de la MASW est donc exclue. Ce type de forage a été choisi pour apporter une information détaillée et fiable des vingt premiers mètres des terrains constituant le village de Bargemon. Le recours au carottage ne permet pas d'enregistrer les paramètres géotechniques des terrains traversés contrairement à un sondage géotechnique (sondage destructif). De plus, aucun sondage géotechnique n'était disponible le long/à proximité des lignes d'acquisition

sismique MASW. L'exploitation des résultats MASW pourra être complétée par l'apport d'informations géotechniques (ex. sondage pressiométrique : étude des PI, E/PI...).

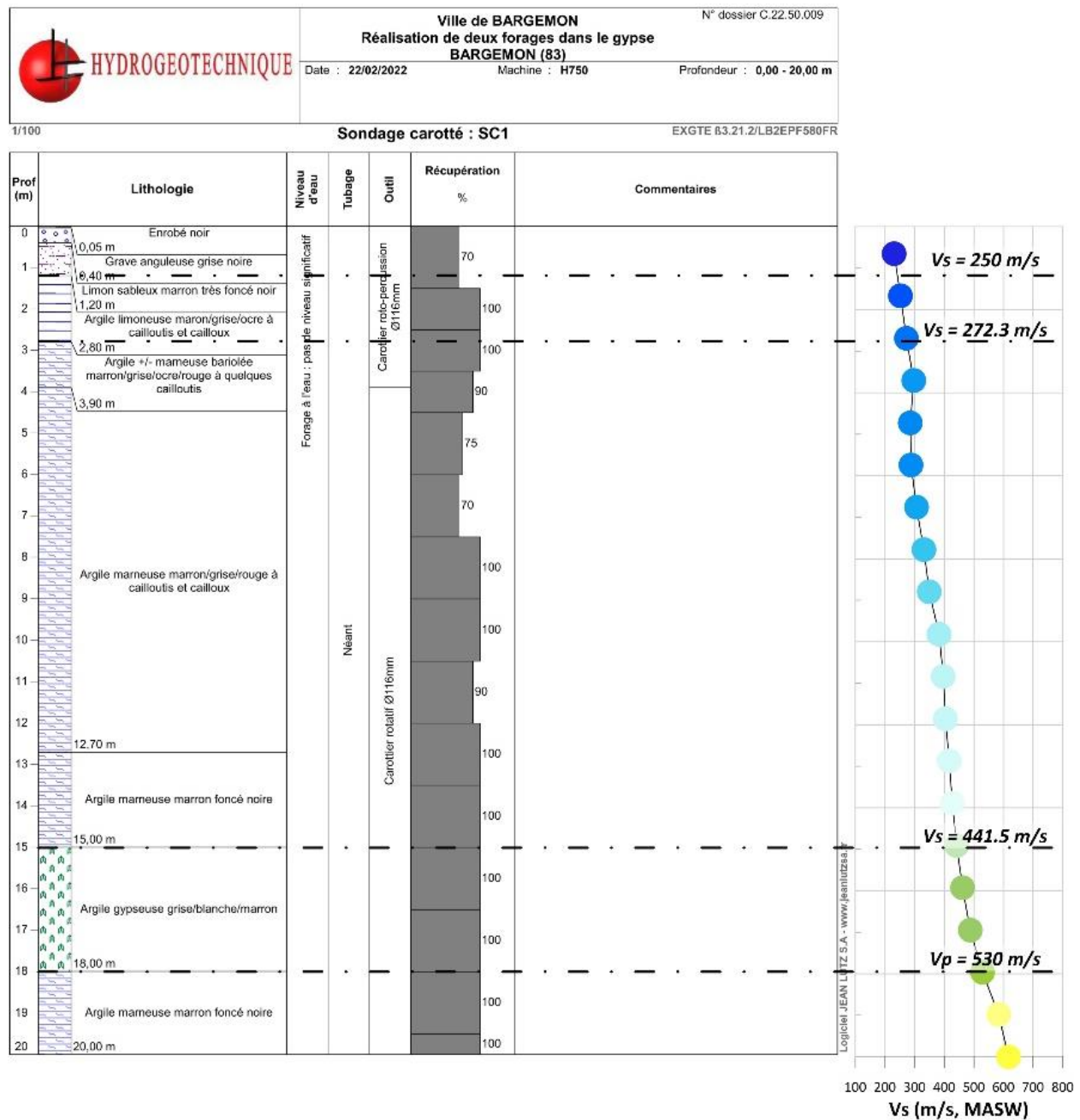


Illustration 112 : Extraction des vitesses sismiques V_s (MASW) le long du forage SC1 situé sur la RD19.

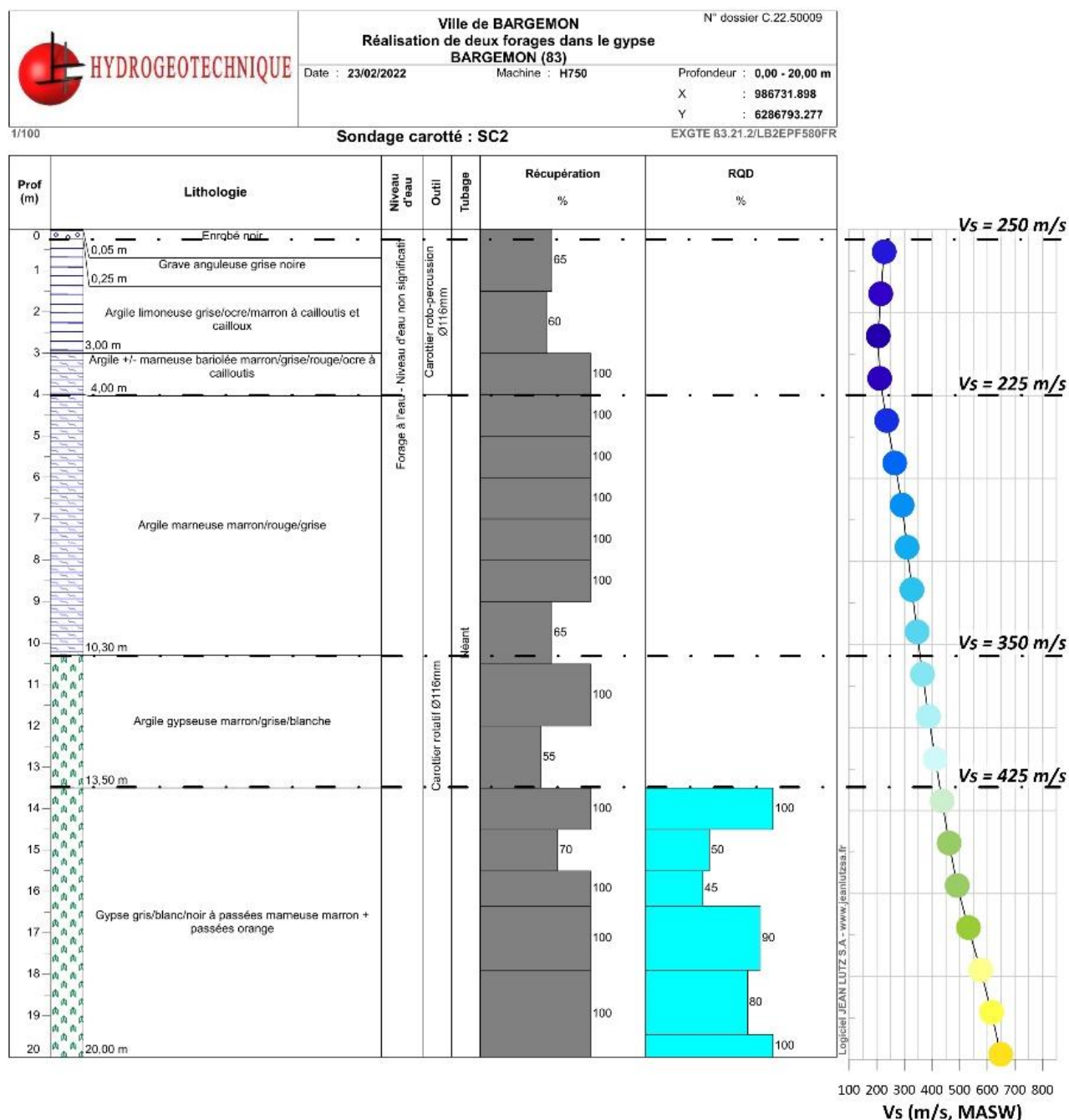


Illustration 113 : Extraction des vitesses sismiques Vs (MASW) le long du forage SC2 situé sur la RD19.

• Comparaison des Vs avec les données de vulnérabilité du bâti

Une représentation cartographique des résultats MASW du cœur du village (MASW à 0,5 m, P1 à P5, P7 et P8) a été réalisée afin de comparer la répartition spatiale des Vs avec les résultats de l'évaluation des dommages (section 3.4). Pour cela, l'altitude des isocontours 200, 300, 350, 425 et 600 m/s a été extraite le long des coupes 2-D. Après géoréférencement du jeu de données, les épaisseurs de ces terrains ont été calculés et représentées en carte (ex. épaisseur des terrains à Vs < 300 m/s, Illustration 114).

Les profils PS6 et PS12 qui concernent pour partie le cœur du village, n'ont pas été intégrés à cette analyse. En effet, leur résolution d'acquisition (2 m inter-capteur) étant différente des autres profils (0,5 m), elle implique des écarts entre les deux jeux de données, inhérents aux procédures de traitement et qui ne permettent pas une analyse conjointe des résultats.

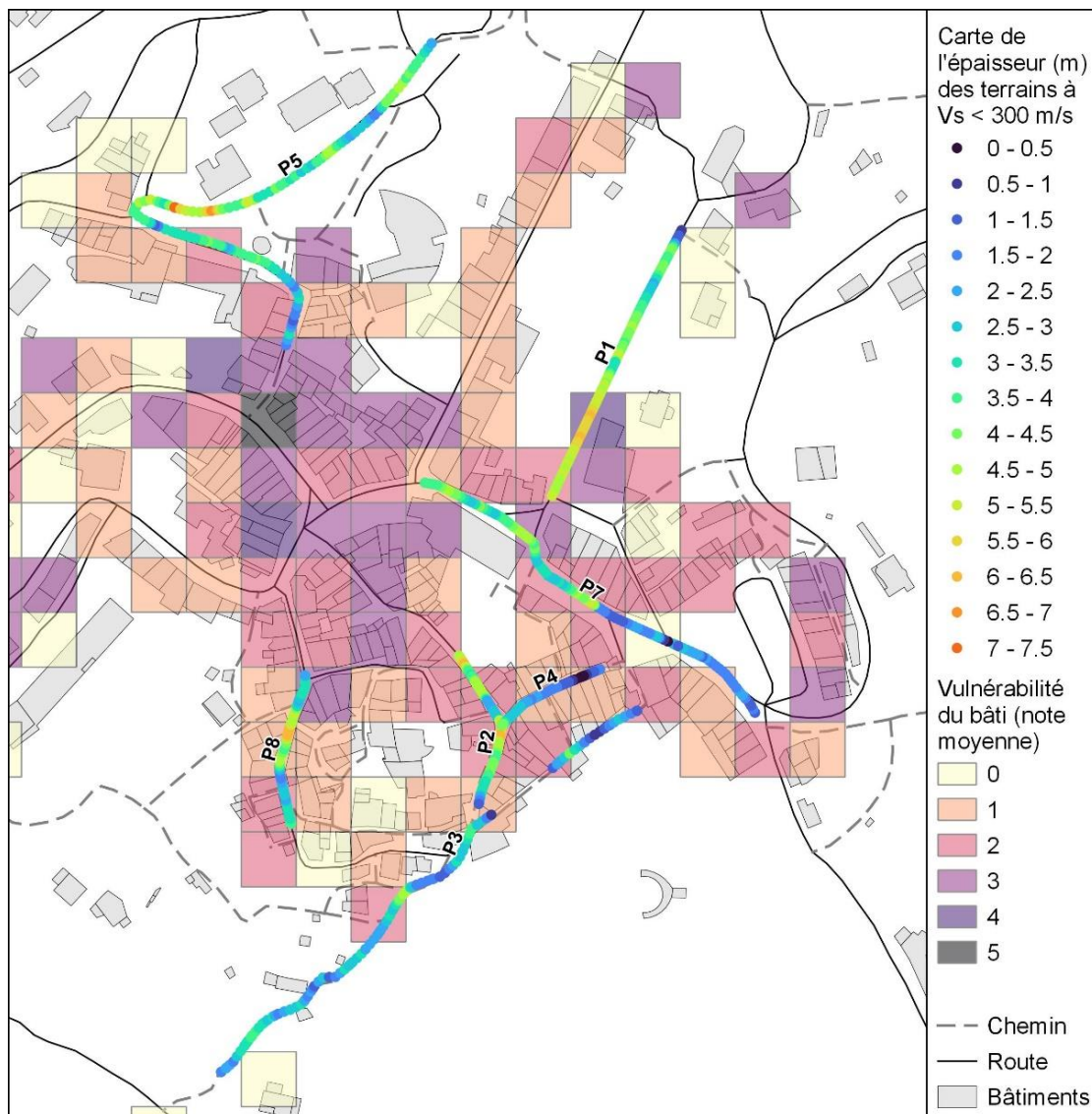


Illustration 114 : Carte de l'épaisseur des terrains dont les vitesses $V_s < 300$ m/s. Cette carte a été produite à partir des résultats MASW obtenu avec les dispositifs à 0,5 m de distance inter-capteurs.

L'identification visuelle d'une quelconque corrélation entre épaisseur des terrains à faibles vitesses et vulnérabilité du bâti étant délicate, une représentation graphique a été réalisée (Illustration 115). Pour cela, la note moyenne de la vulnérabilité du bâti a été extraite le long des profils MAWS pour chaque valeurs seuil de V_s retenues.

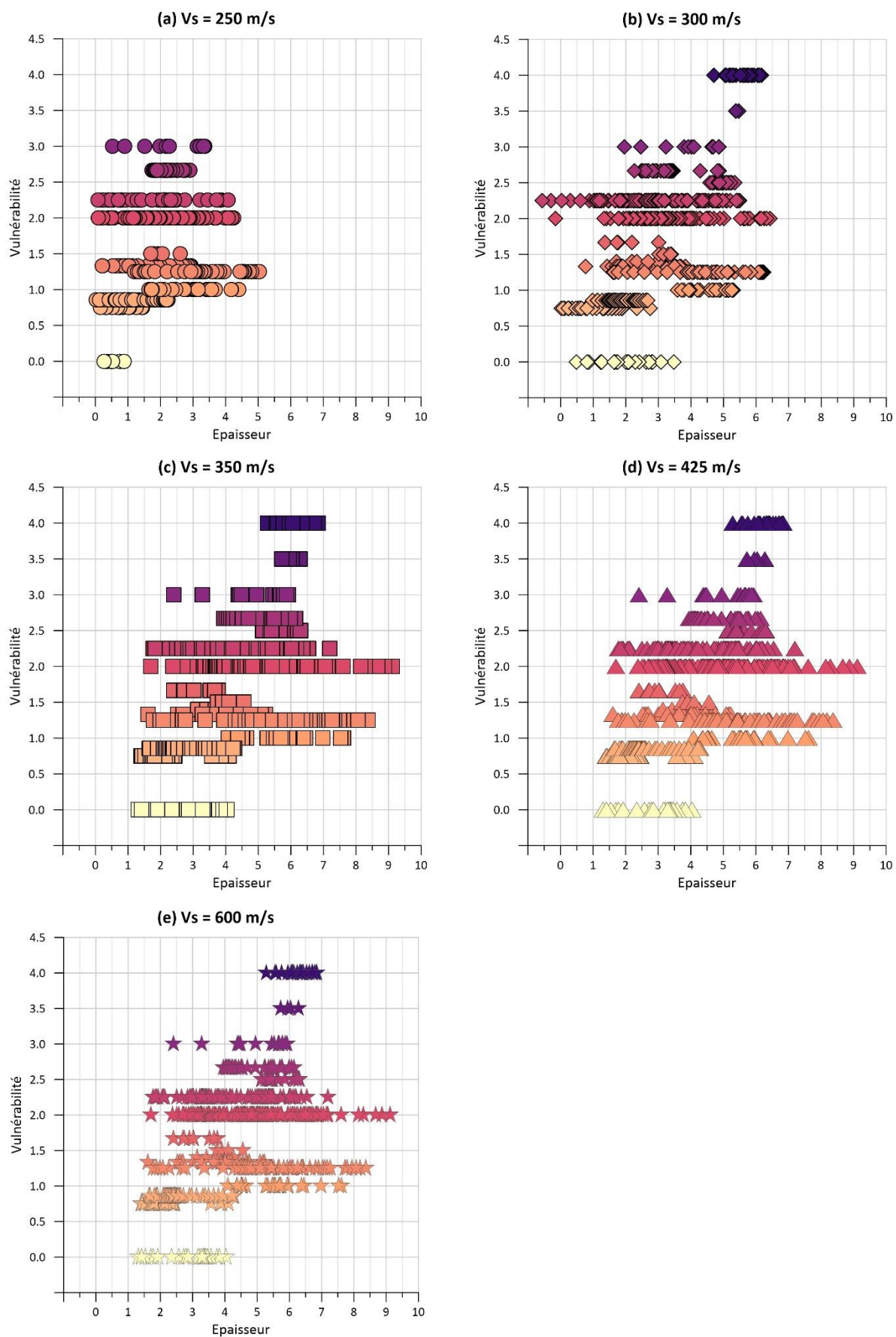


Illustration 115 : Représentation de la variation de l'épaisseur des terrains à différents seuils de V_s en fonction de la note moyenne de la vulnérabilité du bâti associée. (a) : $V_s < 200$ m/s ; (b) : $V_s < 300$ m/s ; (c) : $V_s < 350$ m/s ; (d) : $V_s < 425$ m/s ; (e) : $V_s < 600$ m/s.

Aucune corrélation claire n'est parfaitement identifiable. Toutefois, pour les Vs supérieures à 300 m/s (Illustration 115b à e) une série de points suggèrent un lien entre une surépaisseur de terrains à faibles vitesses et une note élevée de la vulnérabilité (*i.e.* supérieure à 3,5/5). Ces points sont tous situés sur le profil P1 (place St-Étienne), entre les abscisses 65 et 90 m (Illustration 116). Néanmoins, cette corrélation n'est observée qu'en un seul endroit. Certaines zones où des épaisseurs élevées de terrains à faibles vitesses sont observées ne correspondent pas à des notes de vulnérabilités élevées, à l'inverse certaines zones à vulnérabilité élevée sont associées à des secteurs sans anomalie particulière d'épaisseurs des terrains à faibles vitesses. Il ne semble donc pas exister de lien direct entre surépaisseur de terrains à faibles vitesses et vulnérabilité des bâtiments.

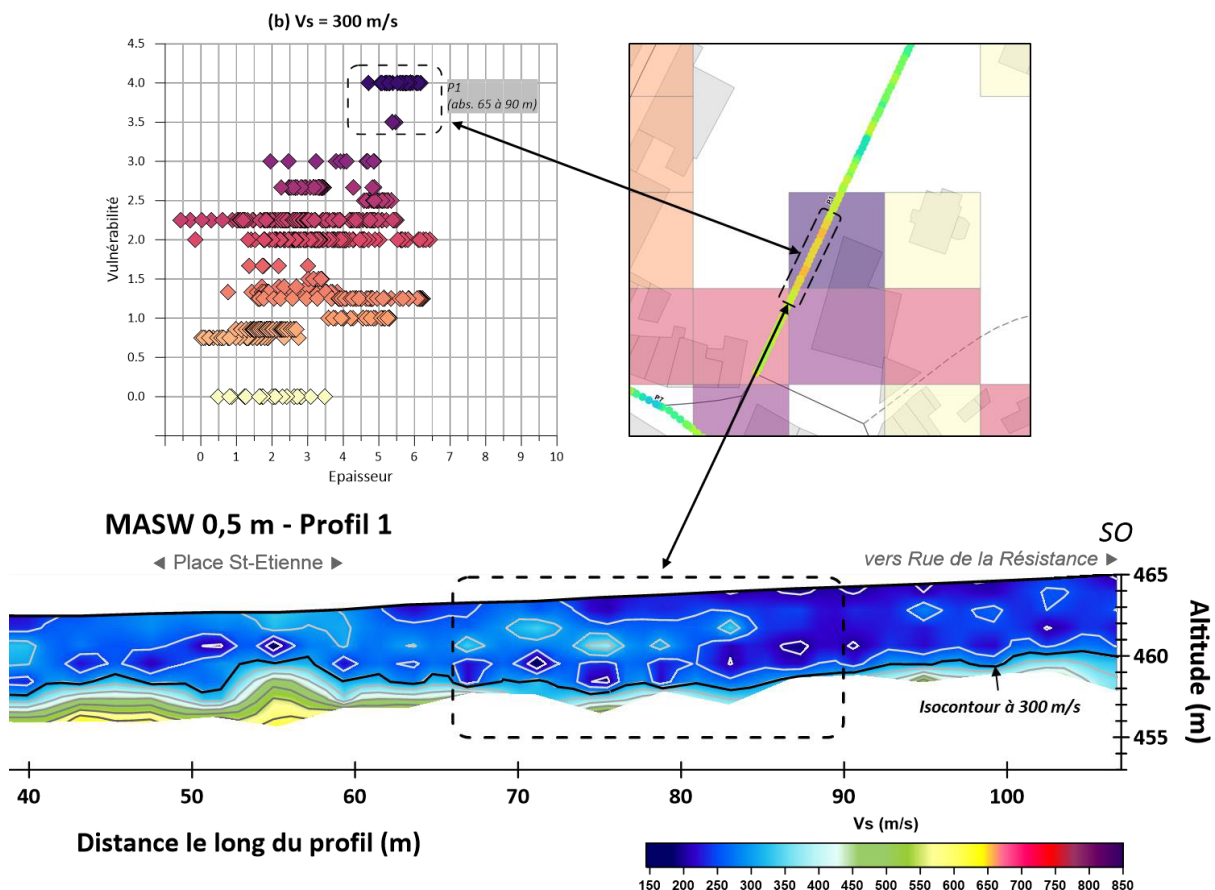


Illustration 116 : Visualisation de la zone où les fortes valeurs de vulnérabilité sont associées à une surépaisseur de terrains à Vs < 300 m/s (entre les abscisses 65 et 90 du profil P1).

■ Vision détaillée de la RD19

L'illustration 117 représente l'ensemble des résultats obtenus des acquisitions sismiques, le long de la rue Jean Jaurès (RD19). Les logs géologiques des forages réalisés dans le cadre de cette étude y sont représentés.

L'imagerie MASW indique une discontinuité verticale marquée à l'abscisse 93 m (Illustration 117 haut, encadré en pointillés).

L'analyse de la coupe des vitesses Vp (obtenue par sismique réfraction, Illustration 117 milieu) indique des terrains allant de 600 m/s (bleu) jusqu'à plus de 5 800 m/s (rouge). Cette coupe est découpée en trois zones distinctes :

- la zone A entre 0 et 200 m d'abscisse. Cette zone est caractérisée par un approfondissement progressif des terrains à $V_p < 1\,700$ m/s (bleu turquoise) depuis le S (5 m d'épaisseur) vers l'abscisse 100 m (25 m d'épaisseur environ). Cette interface remonte brutalement vers la surface à environ 120 m d'abscisse. Sous ces terrains à très faibles V_p , les terrains à vitesses intermédiaires, comprises entre $1\,700 < V_p < 3\,500$ m/s, ont une épaisseur importante, autour de 35-40 m ;
- la zone B entre 200 et 425 m d'abscisse. La remontée des terrains à vitesses élevées ($V_p > 3\,500$ m/s), qui sont visibles dès 30 à 40 m de profondeur dans cette zone, entraîne un amincissement des terrains à faibles vitesses (5-10 m) et à vitesses intermédiaires (20-30 m) ;
- la zone C entre 425 et 600 m d'abscisse. Cette zone est marquée à par un épaissement progressif, vers le N, des terrains à faibles V_p qui passent d'une épaisseur de 5 m à 15 m. Les terrains à $V_p > 3\,500$ m forment une cuvette entre 425 et 530 m d'abscisse. Cette cuvette est associée à une épaissement des terrains à vitesses intermédiaires.

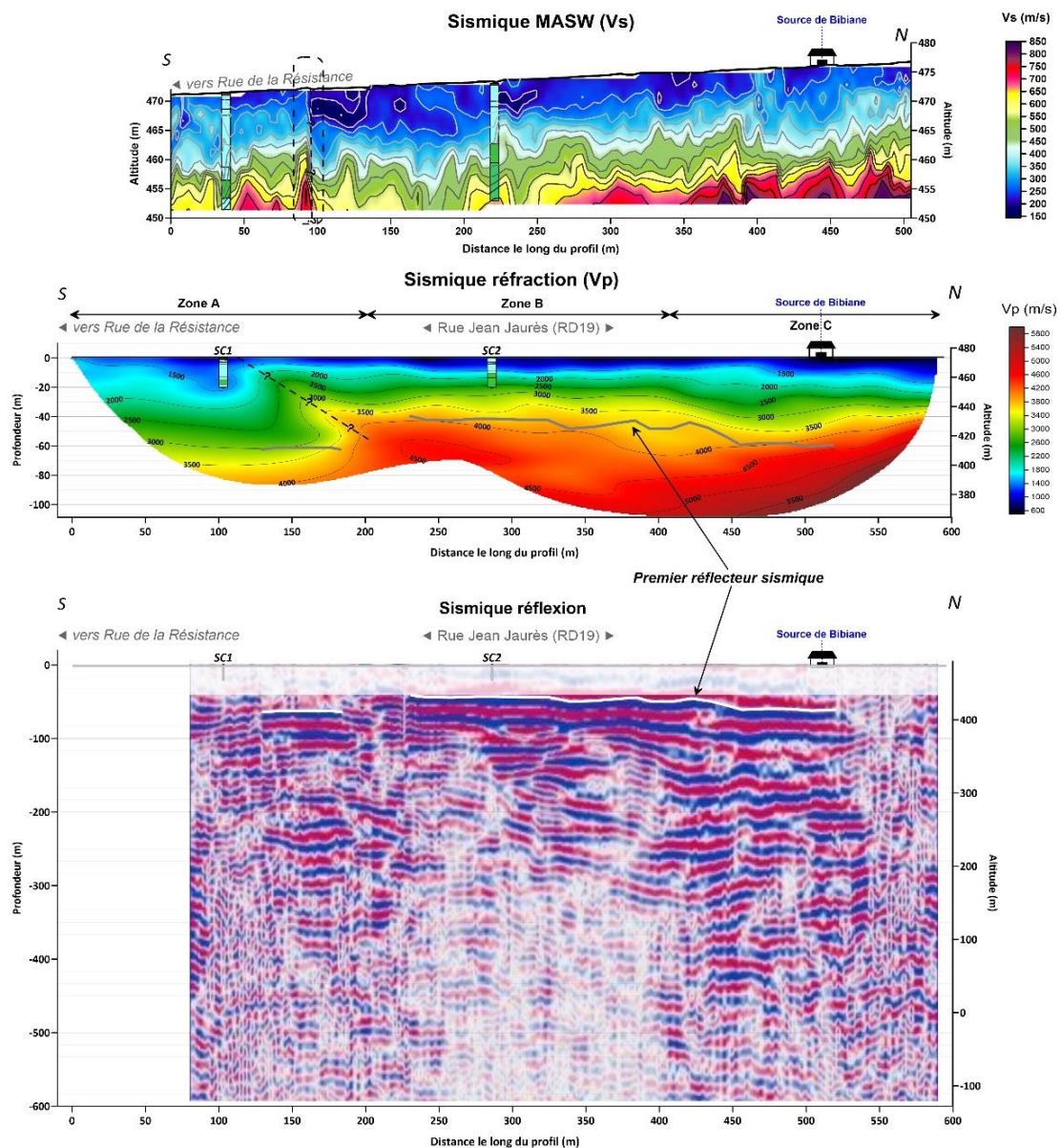


Illustration 117 : Coupes sismiques des Vs (MASW, haut), des Vp (réfraction, milieu) et image en réflexion (bas) le long de la Rue Jean Jaurès – RD19. Légende des log géologie : vert = argiles ; bleu clair : argiles gypseuses.

Sur la coupe de sismique réflexion un réflecteur marqué est identifié et surligné en blanc (Illustration 117 bas). D'après les connaissances géologiques du secteur, ce réflecteur pourrait être associé à des dolomies massives du Muschelkalk. Cette interface correspond à des valeurs de V_p entre 3 500-4 000 m/s (trait gris sur Illustration 117 milieu). En comparant les données des forages SC1 (Illustration 118) et SC2 (Illustration 119) avec les vitesses V_p extraites de ces coupes on constate que :

- le long de SC1, les V_p sont relativement homogènes et faibles (< 1 500 m/s). Lithologiquement, les terrains sont essentiellement constitués d'argiles marneuses. Une passée gypseuse est identifiée. Sa géométrie (3 m de puissance) et sa profondeur (15 m) la rende indétectable par l'imagerie sismique. Les signatures de V_p observées ici sont donc attribuées aux argiles marneuses uniquement.

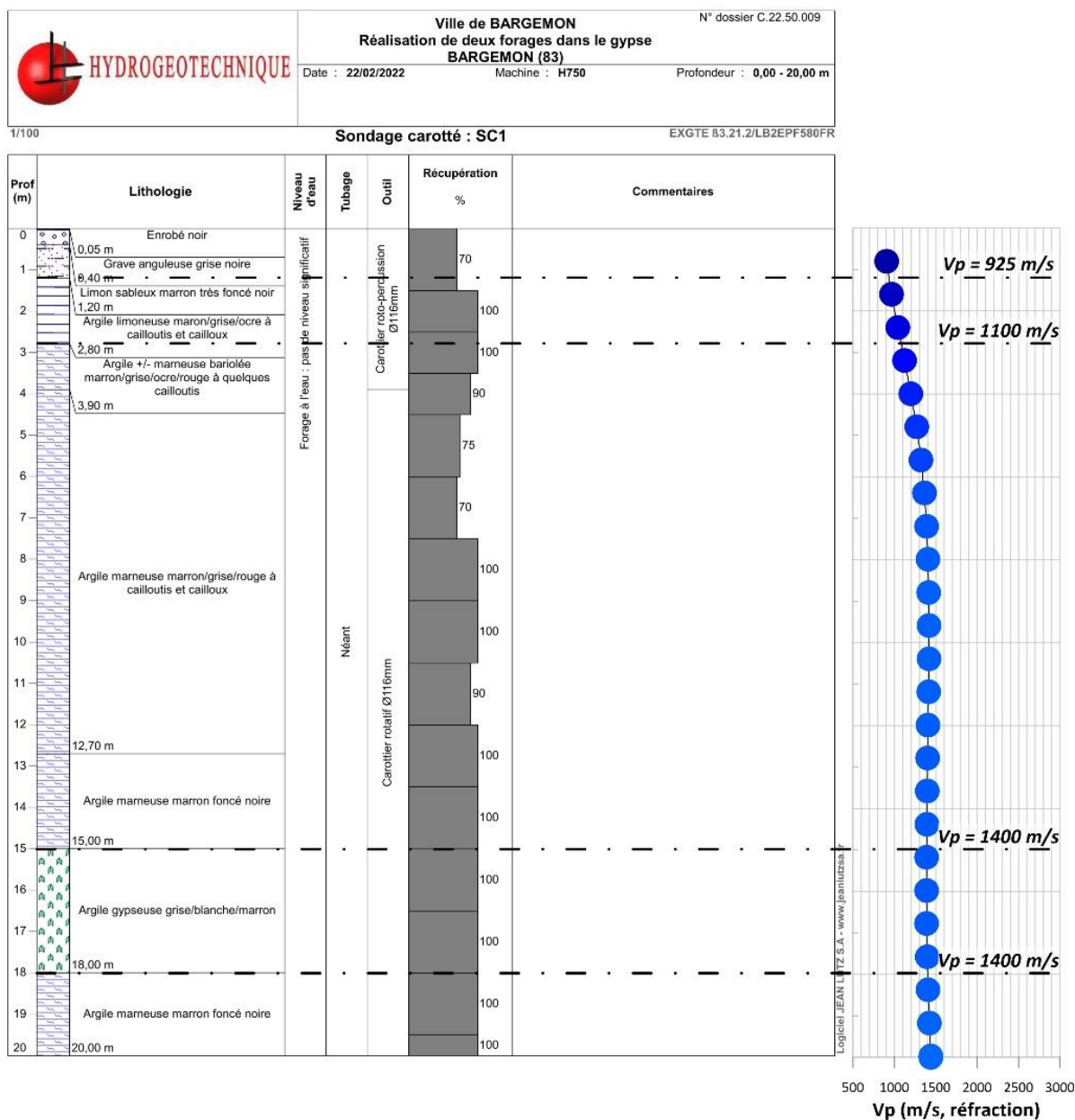


Illustration 118 : Extraction des vitesses sismiques V_p (réfraction) le long du forage SC1 situé sur la RD19.

- le long de SC2, on observe une augmentation progressive des valeurs de V_p qui atteignent 2 600 m/s au fond du sondage. Lithologiquement, la partie supérieure du forage (entre 0 et 10,3 m de profondeur) est constituée d'argiles marneuses (similaires à celles rencontrées sur SC1). En-deçà, les terrains sont constitués d'argiles gypseuses. Le gradient de V_p observé est donc interprété comme un changement de faciès depuis les argiles marneuses vers de argiles gypseuses.

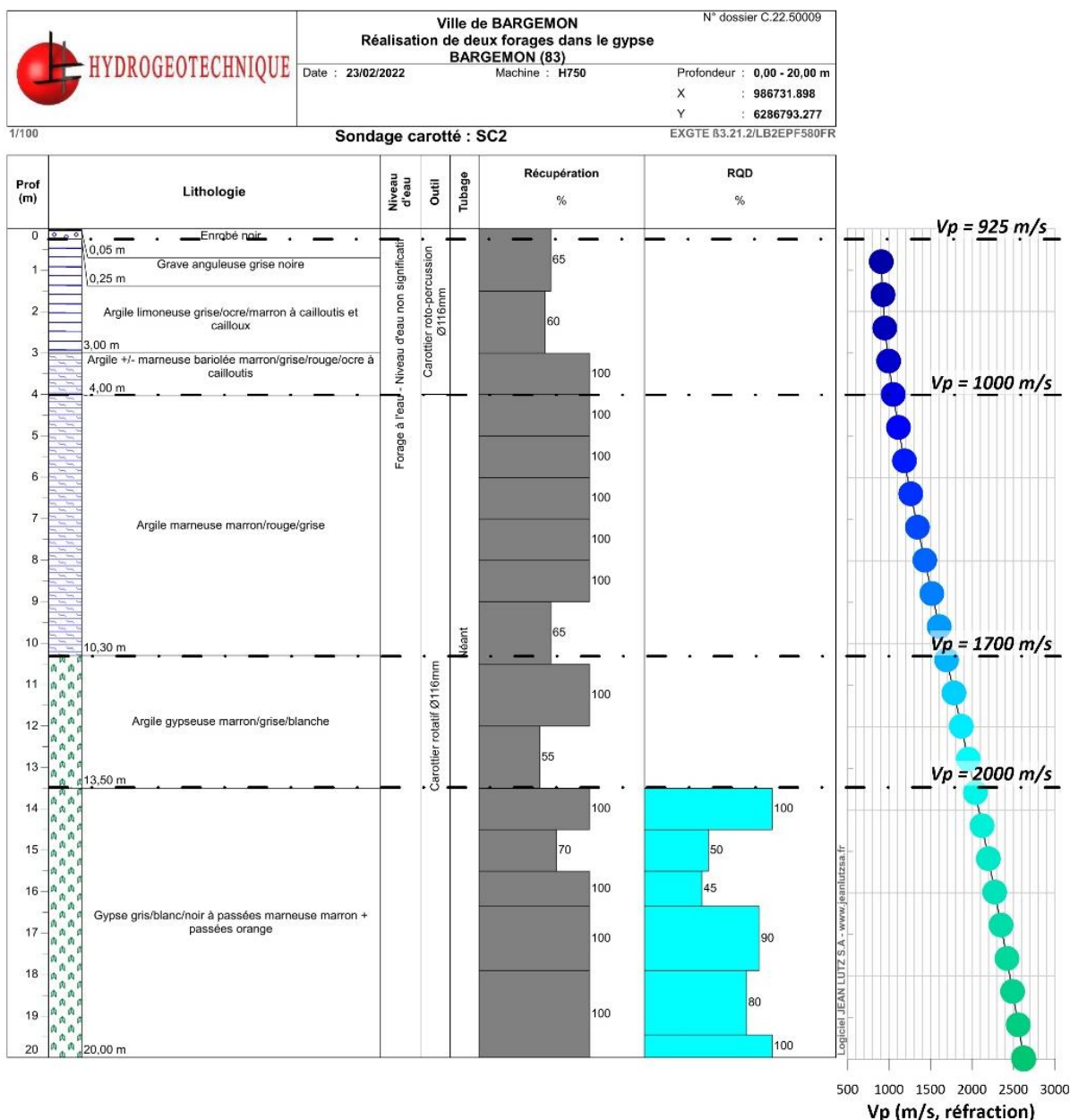


Illustration 119 : Extraction des vitesses sismiques et V_p (réfraction) le long du forage SC2 situé sur la RD19.

Les terrains à faibles vitesses sont donc attribués à des argiles marneuses à passées gypseuses, et les terrains à vitesses intermédiaires correspondraient à des argiles gypseuses. Cette analyse permet de proposer une coupe interprétative le long de la RD19 (Illustration 120). La zone A serait caractérisée par la succession d'argiles marneuses puis d'argiles gypseuses jusqu'à une profondeur d'environ 70 m. Dans la zone B, la remontée des dolomies massives entrainerait un

amincissement de ces formations de couverture dont l'épaisseur serait de 30-40 m (1/3 d'argiles marneuses à passées gypseuses, 2/3 d'argiles gypseuses). Enfin, vers le nord, dans la zone C, l'approfondissement puis la remontée du toit des dolomies seraient associés à un épaissement puis un amincissement des argiles gypseuses sus-jacentes. Sur cette portion de la RD19, les argiles marneuses superficielles augmentent progressivement vers le N.

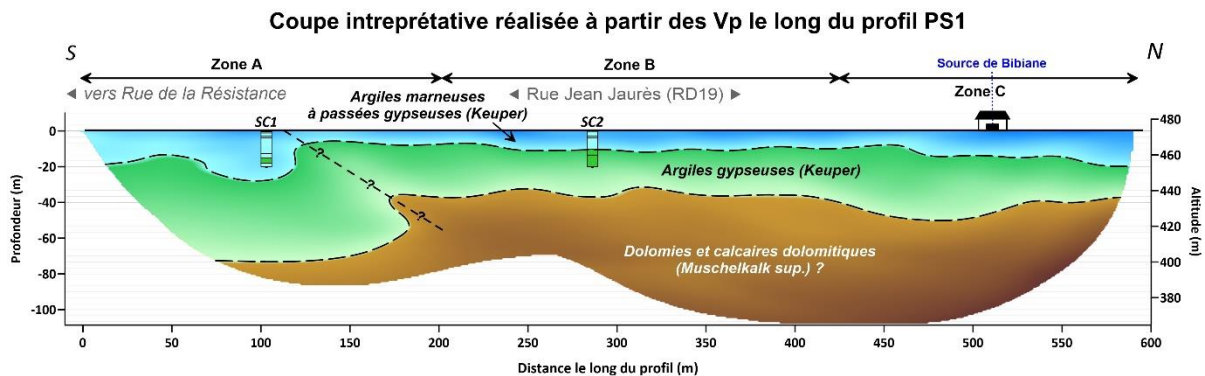


Illustration 120 : Coupe interprétative réalisée à partir de la coupe des vitesses sismiques Vp obtenue le long de la RD19.

■ Apport de l'imagerie sismique à l'étude

L'absence de lien apparent entre l'épaisseur des terrains à faibles et très faibles Vs avec les données de vulnérabilités de bâti indique que l'origine des dommages observés ne semblent pas liée aux formations superficielles du cœur du village de Bargemon (*i.e.* d'éventuels remblais ou terrain décomprimés entre 0 et 10 m de profondeur). Cette interprétation pourra être affinée par des sondages géotechniques dédiés.

L'analyse conjointe de l'imagerie sismique et des données de forages a permis de proposer une coupe interprétative des terrains constituant le sous-sol sous la RD19, jusqu'à une profondeur maximale de 100 m. L'imagerie sismique a ainsi mis en évidence que le toit des formations massives (dolomies, calcaires dolomitiques) se situe à plus de 40 m de profondeur et ondule fortement. Cela implique une variabilité importante des formations de couverture contenant du gypse. Ces observations sont par ailleurs confirmées par le modèle sismique 3-D, bien que sa résolution soit plus grossière et qu'il manque de contraintes par des données de forages profonds.

L'ensemble des résultats sismique a ainsi fortement contribué aux connaissances géologiques globales de l'étude et ont notamment permis d'implanter les sondages carottés.

4. Interprétation de l'ensemble des résultats

Dans un premier sous chapitre 4.1, un bilan succinct est d'abord proposé volet par volet avant une interprétation plus globale d'ensemble. Dans un second sous chapitre 4.2, une première valorisation globale de l'ensemble des données est donnée sous forme de découpages du territoire communal en zones homogènes. Ce travail de découpage en zones homogènes est une étape préalable et indispensable de toute méthodologie de cartographie de sensibilité telle que déclinée ensuite au chapitre 5 suivant.

4.1. BILAN INTERPRÉTATIF DES RÉSULTATS : AVANCÉES, LIMITES ET PREMIÈRES RECOMMANDATIONS

Des progrès certains ont été apportés en géologie sur les formations gypsifères du Keuper et leur organisation structurale (e.g. alignement orienté N110 des principales masses de gypse et des fontis déjà connus ou nouvellement découverts). Il demeure cependant encore de grosses incertitudes sur la géologie (1) en surface (faute d'affleurements visibles), et (2) surtout en profondeur pour pouvoir spatialiser à minima les horizons de gypse (manque de sondages au-delà des 20 premiers mètres de profondeur et bien répartis). Du fait aussi des mauvaises conditions d'observations à l'affleurement, la zone de transition mise à jour entre les compartiments est et ouest reste mal cernée. De manière générale, de nombreux secteurs éloignés des enjeux et des voies d'accès restent encore inexplorés.

⇒ ***C'est principalement la réalisation de forages carottés supplémentaires entre le centre bourg et le Riou dans les deux compartiments est et ouest qui permettraient d'avancer significativement sur le sujet ; cela permettrait alors la réalisation d'un premier modèle géologique 3D pertinent sous Géomodeler²⁹ des lithologies et structures tectoniques du Trias (marnes, argiles, dolomies, gypses) et des roches sus-jacentes (jurassiques, remblais).***

La géophysique a apporté quelques éclairages nouveaux, notamment pour la géologie. Elle a également permis de faire avancer et d'orienter la réflexion tout au long de l'étude sur les secteurs à investiguer en priorité ou non, et les choix de localisation de forage par exemple. L'imagerie électrique a permis de confirmer et clarifier le contexte géologique et structural à l'origine de l'effondrement du Peyrui : une accumulation de gypse liée à l'anticlinal associée à une fracturation des terrains susceptibles de constituer des drains favorisant l'infiltration d'eau. L'identification de ce contexte favorable à la formation d'effondrements contribue à l'évaluation globale du risque réalisée dans la suite de cette étude. La sismique a montré que l'absence de lien apparent entre l'épaisseur des terrains à faibles et très faibles Vs avec les données de vulnérabilités de bâti indique que l'origine des dommages observés ne semblent pas liée aux formations superficielles du cœur du village de Bargemon (i.e. d'éventuels remblais ou terrain décomprimés entre 0 et 10 m de profondeur). Cette interprétation pourra être affinée par des sondages géotechniques dédiés. L'analyse conjointe de l'imagerie sismique et des données de forages a permis de proposer une coupe interprétative des terrains constituant le sous-sol sous la RD19, jusqu'à une profondeur maximale de 100 m. L'imagerie sismique a ainsi mis en évidence que le toit des formations massives (dolomies, calcaires dolomitiques) se situe à plus de 40 m de profondeur et ondule fortement. Cela implique une variabilité importante des formations de couverture contenant du gypse. Ces observations sont par ailleurs confirmées par le modèle sismique 3-D,

²⁹ Ou logiciel équivalent

bien que sa résolution soit plus grossière et qu'il manque de contraintes par des données de forages profonds. L'ensemble des résultats sismique a ainsi fortement contribué aux connaissances géologiques globales de l'étude et ont notamment permis d'implanter les sondages carottés.

⇒ ***Pour une meilleure caractérisation des terrains d'assises de fondation (et de compréhension des dommages subis par les bâtiments), il pourrait être tenté une série de forages courts (carottés de calages et surtout des sondages légers de type pénétrodynamique ou pressiométrique par exemple) pour chercher à caractériser a minima les lithologies présentes (remblais, marnes, argiles, dolomies ?) et la corrélérer aux résultats sismiques 2-D de l'hyper centre du village et en cas de résultats favorables aboutir à une cartographie des formations de surface. Le modèle 3-D quant à lui demanderait des forages profonds pour être pleinement exploité. Lorsqu'un premier modèle géologique aura pu être construit, d'autres levés géophysiques pourraient ensuite permettre d'affiner les contraintes du modèle.***

La compréhension du fonctionnement hydrogéologique des massifs de la commune a fortement progressé, mais malgré le rôle central de l'hydrogéologie dans la dissolution du gypse, la vision maîtrisée des processus est circonscrite à des territoires relativement réduits (et floue, incertaine voire totalement inconnue ailleurs), ceci malgré des moyens mobilisés conséquents. Le contexte climatique conjoncturel défavorable (déficitaire en eau et avec peu d'épisodes pluviométriques marqués) n'a pas aidé.

⇒ ***En effet, ce sont des suivis en continu sur des périodes conséquentes, et en conditions bien plus contrastées (alternance de périodes déficitaires et excédentaires, surtout en cas de fortes re-saturations généralisées des versants) qui permettraient de davantage capitaliser d'informations sur les dynamiques de dissolution. Ensuite, compte tenu de la zone d'anomalie de la plaine du Riou, outre la caractérisation des couches à l'origine de la dissolution plus ou moins en profondeur (Keuper, Muschelkalk), il sera utile d'équiper quelques forages dans la plaine du Riou et en pied de butte pour réaliser un suivi des caractéristiques des eaux souterraines (niveaux piézométriques et suivi de la conductivité électrique) afin de mesurer en direct l'intensité du phénomène de dissolution et en comprendre la dynamique sur le long terme. En attendant de disposer de tels ouvrages, le suivi en continu de quelques sources clés du village (source du Clos et source de la Traverse du Lauron) permettra de disposer de mesures de suivi de la dissolution du gypse et d'essayer d'en comprendre davantage la dynamique naturelle au fil des années (et de s'assurer que la situation reste peu active sans dégradation brutale). Pour les fondations des maisons touchées, un inventaire exhaustif du réseau de drainage et de son fonctionnement (dans son état actuel) pourrait aussi permettre d'identifier si des maisons en seraient directement impactées et dans l'affirmative apporter des améliorations locales de drainage pour la préservation du bâti.***

Depuis juin 2022, les données interférométriques sont devenues à la fois plus robustes et plus détaillées³⁰. Elles ont pu confirmer et affiner la zone d'affaissement active de la plaine du Riou déjà identifiée en début d'étude et partiellement reconnue en géophysique (***travail qui restera à poursuivre par forages géologiques carottés pour identifier et caractériser les couches de gypse en cause***). On dispose par ce biais, et gracieusement pour la mise à disposition des données, d'un suivi directement opérationnel de la principale zone de dissolution de la commune de Bargemon.

³⁰ <https://egms.land.copernicus.eu/>

⇒ ***De nouvelles mesures des mois et années à venir devraient permettre de savoir à court terme si la dissolution continue bien de ralentir, ceci au moins jusqu'à la fin d'un nouveau cycle de saturation des versants avec un effet différé pour aboutir à une accélération des déformées verticales. À plus long terme, il pourrait devenir possible de définir (à l'instar des glissements) des seuils hydroclimatiques de l'activité de dissolution du gypse (par comparaison des chroniques de déformées avec les chroniques pluviométriques). Il restera à voir si les données antérieures aux actuels satellites Sentinel1 (Envisat) de moindre qualité apportent des éléments ou si la période d'activité de la dissolution du gypse d'avant 2015 ne pourrait être réévaluée partiellement, par rétrocalage.***

L'approche dommage aux bâtis apporte peu d'informations sur les processus de dissolution du gypse d'un point de vue global mais cet état des lieux restera essentiel à suivre en cas de poursuite des dégradations. À ce stade, le principal enseignement sur ce volet est qu'il convient de raisonner de manière individuelle (chaque bâtiment ayant *a priori* son comportement spécifique et ses sollicitations et interactions propres) et non de manière globale.

⇒ ***Dans le contexte, si l'entretien courant des bâtiments s'impose partout sans exception, le diagnostic structurel et la sécurisation éventuelle des bâtiments les plus endommagés identifiés reste à envisager de manière particulière au cas par cas.***

4.2. DÉCOUPAGE DU TERRITOIRE COMMUNAL EN ZONES GÉOLOGIQUES HOMOGÈNES

Au regard des sous chapitres précédents, les données géologiques sont clairement un facteur clé pour le découpage du territoire communal en grandes zones homogènes.

Toutes les autres données ne sont connues que partiellement voire que ponctuellement (sans possibilité d'interpolation) et elles ne sont ainsi pas valorisables pour participer à ce travail de découpage en grandes zones homogènes³¹. Leurs valorisations seraient faites par la suite au sein des grandes zones homogènes pour ajuster ponctuellement et autant que besoin le niveau de sensibilité (au chapitre dédié 5).

De manière schématique, plus le gypse est profond, plus il est protégé des eaux sous saturées percolant depuis la surface, moins il est susceptible d'être dissous. Cette approche caricaturale reste globalement correcte à l'échelle de la commune, mais déjà moins satisfaisante à l'échelle de travail (1/25 000), ce qui obligera ensuite à des ajustements locaux déjà cités ci-dessus et détaillées au chapitre 5 à venir.

C'est donc la profondeur connue ou estimée des formations gypsifères qui va être le principal facteur de découpage en grandes zones homogènes.

On distingue déjà les secteurs :

- où les formations gypsifères sont à l'affleurement (Keuper t3 surtout, plus localement Muschelkalk Supérieur t2c), y compris sous des placages généralement étendus et peu épais d'éboulis (E) ou alluviales (Fz). Le gypse y est rarement rencontré directement à l'affleurement

³¹ À une exception très notable près avec les désordres avérés où les phénomènes d'intensité élevée sont tout alignés à proximité de l'axe de l'anticlinal de Sambourette-Peyrui et où ils contribuent à définir et délimiter une zone spécifique.

et la première couche de gypse la plus superficielle est plutôt rencontrée à 5 m au pire localement et généralement au-delà de 10 m, voire jusqu'à plus de 30 m de profondeur (avec recouvrement plutôt argileux dominant dans les franges d'altérations de colluvions et autres, localement sous recouvrement dolomitique) ;

- où les formations gypsifères sont masquées sous des formations du Rhétien à l'affleurement (I1), constituées d'une alternance de marnes feuilletées, marno-calcaires et calcaires durs. Localement, ces formations rhétiennes plutôt semi-perméables ne sont pas présentes partout et on a alors retenu une bande de terrain équivalente en largeur à celle observée à proximité à pente similaire dans les terrains jurassiques J_D ou sous un glacis associé d'éboulis jurassiques (E). La puissance maximale des horizons rhétiens étant de quarante mètres, cela indique que la profondeur des horizons gypsifères est d'au moins de 10 à 40 m de plus que précédemment ;
- où les formations gypsifères sont plus largement enfouies sous les flancs des buttes jurassiques calcaires tabulaires. Il a été retenu une cinquantaine de mètre d'épaisseur (5 lignes de niveaux altimétriques IGN), soit des horizons gypsifères de 50 m de plus que précédemment ;
- dans les cœurs de buttes jurassiques plus hautes, les horizons gypsifères sont à une profondeur d'au moins 70/80 m jusqu'à plus de 100 m. Le gypse est donc à profondeur importante sous des horizons aquifères et *a priori* en permanence ennoyés. En dehors du cas des buttes jurassiques présentes au sud, est et ouest de la commune, on retrouve au nord et au sommet de la commune un vaste plateau calcaire jurassique épais où les formations gypsifères sont immédiatement profondes au-delà de la zone de bordure du plateau.

À côté de ce premier découpage selon la profondeur, c'est le changement dans les axes de pli des formations gypsifères entre la partie est de la commune (pour environ 1/3) et la partie ouest (pour environ 2/3) qui est souligné (Illustration 121). La zone de transition des structures géologiques selon l'axe de faille normal N10 s'observe ponctuellement bien à l'est de Peyrui et se poursuivrait en pied de la butte du village mais son tracé reste par ailleurs bien plus flou, faute de points d'affleurements lisibles et visibles (cette bande transitoire correspond à la bande grisée de l'illustration 121).

4.2.1. Secteurs à l'affleurement

Sur les secteurs à formations gypsifères affleurantes, on note de manière très distincte par rapport au reste du territoire le secteur de l'Anticlinal de Sambourette-Peyrui au nord du centre bourg où sont alignés sur un axe N110 toute une série d'effondrements d'ampleur (majoritairement proche ou > à 10 m), y compris des effondrements pluridécamétriques (Peyrui, Trou du Baou)³². C'est aussi cette seule zone où des surépaississements locaux (jusqu'à plusieurs dizaines de mètres) du gypse sont ponctuellement observés, avec des indices associés morphologiques de micro-diapirs locaux. Cet anticlinal nord de Sambourette est coupé sensiblement en son milieu par une faille orientée N10°-20° et à décrochement dextre, ré-identifiée par les reconnaissances à l'est immédiat de l'effondrement du Peyrui (Illustration 37).

Dans le compartiment ouest, la zone concernée enveloppant tous ces désordres très significatifs et points d'affleurements de gypse signalées s'étend autour de l'axe du pli sur 225 m environ au

³² qu'on pourrait même qualifier d'intensité très élevée (en anticipation du tableau à venir de la grille des intensités de l'illustration 123)

sud (coté aval) et plutôt sur 300 côté nord (amont)³³. À son extrémité est, l'anticlinal s'estompe avec une bifurcation de l'axe vers le sud et une largeur *a priori* moindre.

Dans le compartiment est, il y aurait mise à l'affleurement des formations gypseuses sous-jacentes du Muschelkalk³⁴ au cœur du pli sur une largeur de près de 300 m avec report en latéral des formations affleurantes du Keuper tant du côté nord que du côté sud. Sur ce compartiment est, plus raide, boisé et moins bien reconnu, on a donc considéré par défaut une bande de largeur équivalente à celle de l'ouest, majoré de 300 m.

Les deux compartiments ouest et est de l'Anticlinal Nord de Sambourette –Peyrui forment chacun une zone homogène.

Pour le reste du secteur des formations gypsifères à l'affleurement, on a une large zone homogène étalée en continu en aval des buttes et du plateau nord dans le compartiment ouest. Dans le compartiment est, on a deux zones homogènes séparées entre elle par la zone homogène de l'anticlinal nord.

Au total, le secteur des formations gypsifères à l'affleurement est donc découpé en 5 zones homogènes en tout.

Les secteurs où les formations gypsifères ne sont pas affleurantes correspondent pour l'essentiel au plateau jurassique au Nord et les différentes buttes autour du centre bourg (1 à l'est, 1 au sud-est), 1 au sud-ouest, 1 à l'ouest, 1 au nord-ouest et entre les deux dernières deux buttes dont la dernière alignée N110 et découpée en 3 mamelons par le réseau hydrographique).

4.2.2. Secteurs en pied de buttes jurassiques

Elles correspondent à la base des buttes jurassiques et du pied de plateau jurassiques. Il y a même continuité dans les zones d'affleurement du Rhétien dans le compartiment ouest entre la base du plateau jurassique et celles des buttes du nord-ouest et de l'ouest. Le faciès dominant à l'affleurement est représenté par des marnes.

Il y a ainsi 3 zones homogènes dans le compartiment est et 3 autres dans le compartiment ouest.

Outre les pieds des buttes et du plateau nord, on observe dans le plateau deux zones de fenêtres au sein du plateau et une troisième zone en bordure de plateau où les formations rhétiennes affleurent. Dans ces deux fenêtres, on a même ponctuellement un pointement d'étendue très réduite où le Keuper affleure.

Cela rajoute 3 autres zones homogènes (dont une des fenêtres semblant être à cheval entre compartiments est et ouest).

Il n'y a pas été recensé ou signalé de zones en effondrement, affaissement ou en tassement (mais essentiellement situés hors zones bâties et boisés).

³³ Hors de cette bande d'anticlinal ainsi tracée, le gypse est présent aussi dans ce compartiment ouest à l'affleurement au sud de Sambourette sur Saint Michel à flanc d'un cours d'eau et à hauteur des anciennes exploitations à flanc de versant de la Plâtrière (prises en compte le moment venu au 4.2.2).

³⁴ Il n'a pas été constaté de changements notables majeurs entre secteurs à Muschelkalk affleurant (peu étendus et que dans le compartiment est) par rapport aux autres secteurs à Keuper affleurants.

4.2.3. Secteurs de flancs de buttes jurassiques

Elles correspondent avant tout aux flancs des 9 buttes jurassiques toutes orientées sur la direction N110 (dont la butte la plus allongée), incisée en 3 par 2 ruisseaux, soit un total de 11 zones homogènes. À l'affleurement sur ces secteurs, ce sont des calcaires dolomités ou non, parfois recouverts par les éboulis de pente.

On retrouve également la zone de transition à flanc du plateau Nord, là où les formations gypsifères du Keuper sont comme pour les flancs de butte jurassiques un peu plus profondes à lithologie similaire (formant également une grande zone homogène).

À l'est du Col du Bel Homme, dans le prolongement est d'une fenêtre triasique (Rhétien à l'affleurement), sous une corniche verticale de calcaires jurassiques bathoniens et masquées aussi par les éboulis de pente, les formations gypsifères pourraient y être présentes, en limite nord-est de la commune, en aval de la bergerie du Duech (1 zone homogène).

Enfin, en périphérie des 3 fenêtres triasiques du plateau Nord, les formations gypsifères sont attendues aussi à profondeur moyenne sous les calcaires jurassiques du plateau (potentiellement encore susceptibles d'être affectées par la dissolution même si en principe de manière plus marginale).

Dans ces secteurs avant tout en contexte karstique, des grottes, avens, petits effondrements ponctuels ou autres indices karstiques sont susceptibles d'être présents en nombre ceci sans lien avec le gypse (et donc non signalés ici). Sinon Il n'y a pas été recensé ou signalé de zones en effondrement, affaissement ou en tassement (mais essentiellement situés hors zones bâties et boisés).

4.2.4. Secteurs non concernés *a priori* par la dissolution de gypse (plateau et cœurs de buttes)

Cela correspond à la zone du plateau jurassique nord³⁵ (1 zone homogène) et aux cœurs des buttes jurassiques (8 zones homogènes) où la profondeur du gypse devient assez profonde pour que les conditions hydrogéologiques ne varient plus vraiment (régime quasiment permanent) et que la dissolution du gypse devienne alors négligeable si pas déjà totalement absent faute de renouvellement et/ou d'écoulement suffisant.

4.2.5. Bilan sur le découpage de la commune en grandes zones homogènes

Au final, le découpage du territoire de la commune de Bargemon aboutit à un ensemble de 36 zones homogènes réparties en 11 familles typologiques (Illustration 121).

On signalera aussi en remarque que le compartimentage est/ouest proposé et considéré ici pour le découpage en grandes zones homogènes ne se discrimine au final pas avec les données dont on dispose à cette échelle (désordres, couverture partielle en investigations notamment hydrogéologiques, anomalie interférométrique du fonds Riou...) et donc il n'aboutira pas à des différences de niveau de sensibilité. Mais il semble très probable que tout approfondissement ultérieur sur le sujet sur les zones avec formations gypsifères à l'affleurement puisse rapidement arriver à déceler des différences sensibles entre ces deux compartiments (tous autres paramètres identiques) donc il est apparu bien plus pertinent d'en tenir compte déjà pour préparer l'avenir.

³⁵ hors zones de fenêtres triasiques et abords,

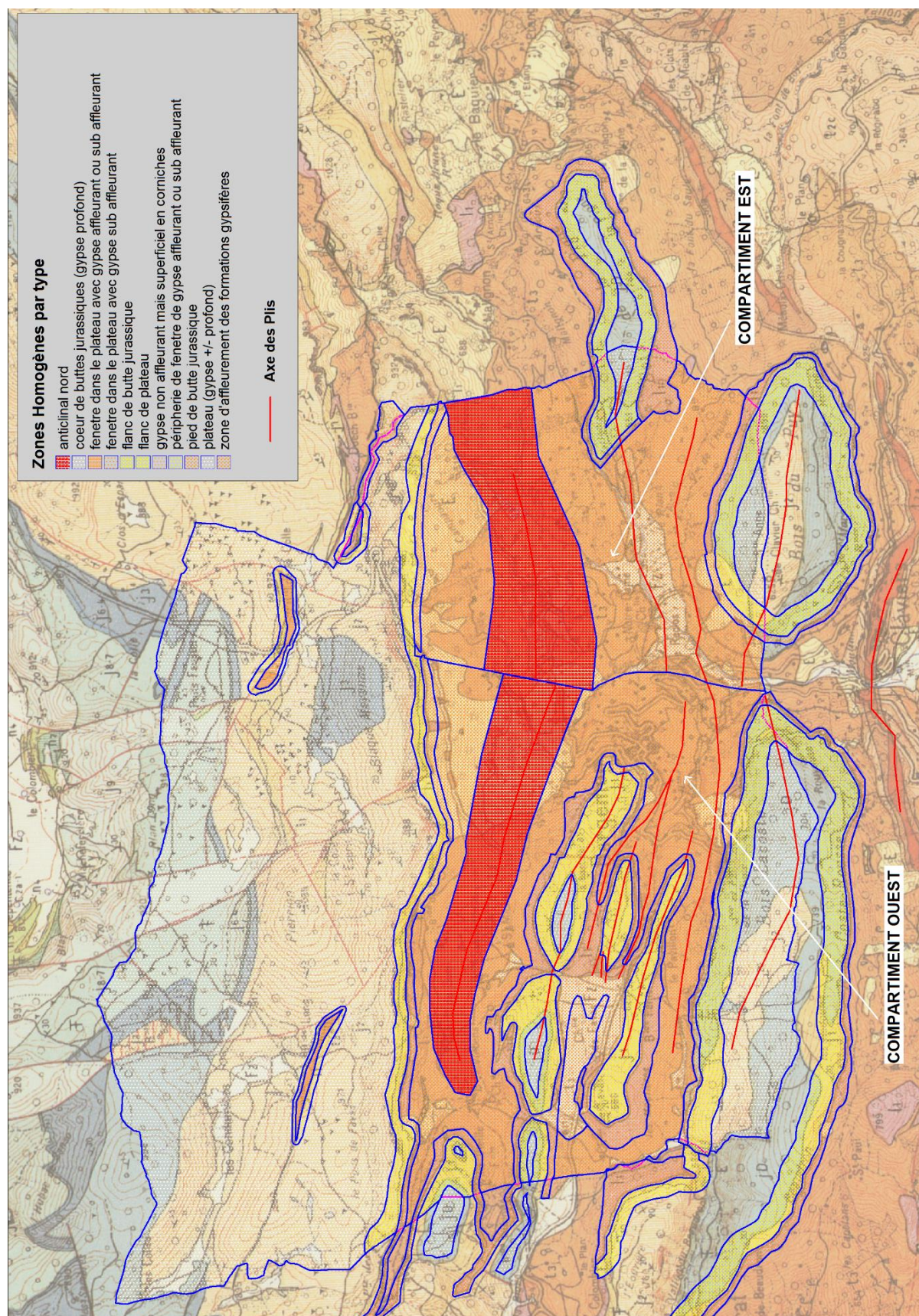


Illustration 121 : Découpages de la commune de Bargemon en grandes zones homogènes (sur fonds de carte géologique BRGM).

5. Cartographie de la sensibilité effondrement lié à la dissolution du gypse

5.1. MÉTHODOLOGIE

La méthodologie employée s'appuie sur le guide intitulé « Dissolution naturelle du gypse dans le sous-sol. Analyse et gestion des aléas mouvements de terrain de type affaissement et effondrement » édité en 2018 par le groupement CEREMA et INERIS (Charmoilles *et al.*, 2018) » ci-après dénommé « Guide Aléa Gypse ». Cette démarche rejoint ce qui avait été prévu dans l'offre de projet, avec une approche conceptuelle globale, et notamment multidisciplinaire (Illustration 122)

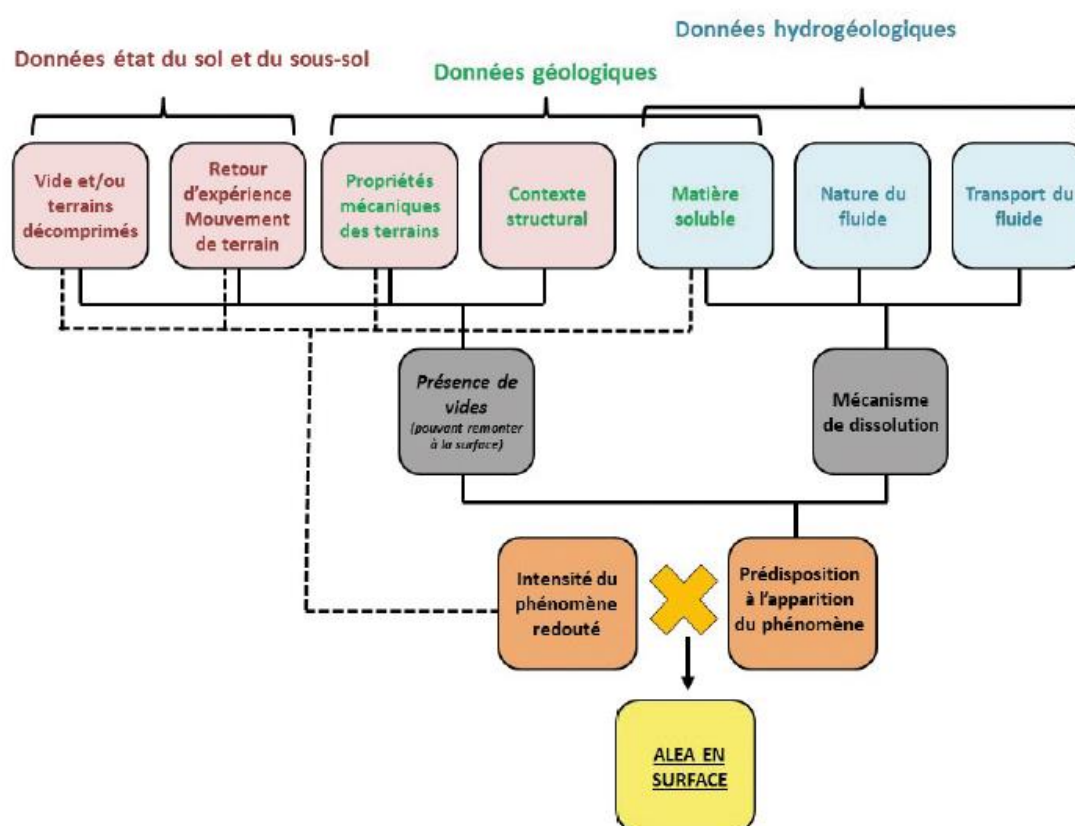


Illustration 122 : Présentation de la démarche d'évaluation de l'aléa mouvement de terrain lié à la dissolution du gypse (Source : Guide Aléa Gypse).

De manière pratique et générale, la valorisation des données collectées ou acquises s'exprime d'abord par deux paramètres synthétiques préalables à caractériser, l'intensité d'une part et la prédisposition d'autre part, avant d'en conclure sur le niveau d'aléa résultant.

Dans le cas précis de l'étude de Bargemon, nous parlerons davantage de « sensibilité » que d'« aléa » pour deux raisons principales :

- les paramètres d'évaluation utilisés l'ont été de façon hétérogène (le terrain n'ayant pas été exhaustif sur l'ensemble de la surface de la commune) ;

- il subsiste des incertitudes dans l'évaluation de l'ensemble des paramètres étudiés.

Ce travail est réalisé à l'échelle de chaque zone jugée homogène géologiquement sensée produire des sensibilités de caractéristiques similaires. Sont distingués les phénomènes d'affaissement et les phénomènes d'effondrement (Illustrations 3 et 4).

L'intensité est de base directement évaluée (Illustration 123) des dimensions des mouvements de terrain avérés les plus significatifs (tant en affaissement qu'en effondrement). Un événement de type affaissement résiduel (d'intensité très limitée) s'assimile à du tassement.

Classe d'Intensité	Phénomènes	Principaux critères de Jugement (non exhaustifs)	Conséquences redoutées
Limitée	Affaissement	Mise en pente < 3 %	Désordres légers de types fissures isolées sans atteintes aux fonctionnalités du bâtiment
	Effondrement localisé	Diamètre de l'effondrement < 3 m	Trou éventuellement profond mais suffisamment étroit pour ne pas affecter immédiatement une fondation classique
Moderée	Affaissement	Mise en pente < 6 %	Fissures visibles à l'extérieur. Les portes et les fenêtres coincent et certaines canalisations se rompent
	Effondrement localisé	Diamètre de l'effondrement < 10 m	Cratère +/- profond et suffisamment large pour ruiner une construction récente en béton même sur radier
Élevée	Affaissement	Mise en pente > 6 %	Désordres structurels importants. Bâtiments inhabitables
	Effondrement localisé ou effondrement en masse de la surface	Diamètre de l'effondrement > 10 m	Cratère important avec parois abruptes et risque d'engloutissement du bâti ou ruine complète et immédiate de plusieurs constructions.

Illustration 123 : Grille des intensités (guide «Aléa Gypse »).

La grille d'intensité proposée ici est la même que celle utilisée dans d'autres contextes (mines, cavités karstiques naturels ou autres cavités souterraines anthropiques (carrières) ou non). Or les dimensions atteintes par les cratères (effondrements) ou cuvettes (affaissements) sont pour les évaporites en général largement plus importantes qu'ailleurs (jusqu'à 2 à 10 fois plus à volume de vide initial équivalent, sauf nette réactivité).

Pour la prédisposition, la grille proposée par le guide croise la typologie du gisement de gypse avec les potentiels hydrogéologiques (hydrodynamiques et hydro chimiques). Pour ce second paramètre, il n'est proposé que deux choix antinomiques (favorables, défavorables). Il reste souvent extrêmement compliqué de caractériser correctement ces potentiels hydrogéologiques et dans nombre de cas peu ou non reconnus et il est très difficile de trancher (trop d'incertitudes)

entre ces deux tendances extrêmes³⁶ (sans compter les cas où les deux potentiels seraient évalués chacun en opposition de l'autre).

Dans le contexte de la commune de Bargemon, où les incertitudes restent nombreuses mais où le **niveau global d'investigations a été relativement approfondi**, la création d'un choix intermédiaire pour les potentiels hydrogéologiques est apparue raisonnable et la grille proposée par le « Guide Aléa gypse » a été modifiée en conséquence.

La proposition de grille de prédisposition modifiée (adaptée au contexte de Bargemon tel qu'étudiée ici) est la suivante (Illustration 124) :

Prédisposition à l'aléa MVT lié à la dissolution du Gypse		Potentiels hydrodynamiques et hydrochimiques des eaux		
		Ecoulements limités à modérées ou eaux saturées	potentiels intermédiaires	Ecoulements intenses et/ou eaux agressives
Gisement	absent	Nulle	Nulle	Nulle
	suspectée	peu sensible	peu sensible	sensible
	avérée	peu sensible	sensible	très sensible

*Illustration 124 : Grille de détermination de la prédisposition
(modifiée par rapport au « Guide Aléa gypse »).*

Ensuite, le croisement des deux paramètres intensité et prédisposition permettent d'obtenir directement le niveau d'aléa ici appelé sensibilité (Illustration 125).

		Prédisposition		
		Peu sensible	Sensible	Très sensible
Intensité	Limitée	Faible	Faible	Moyen
	Modérée	Faible	Moyen	Fort
	Élevée	Moyen	Fort	Fort

Illustration 125 : Détermination des niveaux d'aléa ici appelés niveaux de sensibilité.

5.2. DÉTERMINATION DES ZONAGES DE SENSIBILITÉ

La cartographie de la sensibilité pour Bargemon renverra donc bien à une cartographie mixte effondrement et affaissement mélangé et confondu, dans le sens proposé du « Guide Aléa Gypse » qui parle d'aléa mouvement de terrain liés à la dissolution du Gypse sans dissociation.

³⁶ Le principe de précaution voudrait de retenir le cas le plus défavorable, ce qui tend à une surestimation systématique des niveaux de sensibilité pas toujours en phase avec les réalités de terrain, fussent-elles en partie liées aux incertitudes, incertitudes pas toujours faciles à lever ou à des coûts vite prohibitifs.

Cette méthode d'évaluation de l'intensité, de la prédisposition et donc au final du niveau de sensibilité est d'abord déclinée de manière globale par grandes zones homogènes dont les comportements sont présumées homogènes vis-à-vis de cette sensibilité, en faisant abstraction dans un premier temps de certaines distinctions locales liées à un ou plusieurs paramètres décrits ci-dessus³⁷.

Une fois le niveau global de sensibilité connu pour chacune des grandes zones homogènes, des ajustements locaux de niveaux seront faits dans un second temps, au regard de ces distinctions locales au sein de ces grandes zones homogènes.

5.2.1. Détermination des niveaux de sensibilité de base pour chacune des grandes zones homogènes

Comme les grandes zones homogènes sont nombreuses (36) et qu'au sein des mêmes typologies de grandes zones homogènes (11 familles), le niveau de sensibilité reste systématiquement le même, les résultats (tableaux notamment) seront pour une meilleure lisibilité présentés uniquement par familles de zones homogènes.

a) Examen de l'accidentologie

La plupart des désordres connus sur Bargemon renvoie à des cas d'effondrements localisés (d'intensité modérée dans le cas général, et pour les plus gros tous situées dans l'anticlinal nord à de l'intensité élevée) à l'exception notable des désordres de la rue Jean Jaurès, à hauteur du lieu-dit Estuve ou de Sainte-Bibiane³⁸ (mais alors pour ces deux derniers cas, il s'agirait de phénomènes mixtes : affaissement + glissement).

Pour les secteurs où la dissolution du gypse est possiblement suspectée comme participant aux désordres sur les fondations aux maisons notamment dans le centre bourg et plus particulièrement la rue Marceau (et plutôt comme une origine parmi d'autres, impliquant plusieurs autres mécanismes et causes à la fois : tassement de remblais, léger fluage et/ou retrait gonflement des horizons argileux, vulnérabilité du bâti, manque d'entretien...), il s'agit alors bien d'affaissement et pas d'effondrement.

On notera que les désordres ponctuels connus ou suspectés ne concernent que les secteurs où les formations gypsifères sont à l'affleurement et pas les autres zones homogènes où les couches de gypse sont plus profondes ;

Dans le contexte de la commune de Bargemon, avec de nombreuses zones restées dans leur état naturel rapidement sous une couverture végétale notamment boisée, avec un relief vite irrégulier, loin de tout enjeu même d'usage piétonnier, mais aussi les abords anthropisés des secteurs bâtis, l'inventaire est de loin d'être exhaustif surtout pour les formes les plus discrètes de désordres ponctuels (amorces d'affaissement).

³⁷ Ces distinctions locales liées à certains paramètres influent sur le niveau d'intensité ou la prédisposition. D'une zone homogène à l'autre, il s'agit des mêmes paramètres qui reviennent influencer localement. Ces distinctions locales sont trop nombreuses pour faire un découpage en entités individuelle réellement homogènes au risque d'avoir à afficher une liste trop nombreuse (avec risque de s'y noyer en confusions dans les différents noms alloués et surtout le risque d'en omettre).

³⁸ Pour ce second désordre mixte en talus (glissement + affaissement) lié au gypse altéré/dissous, la localisation exacte du désordre reste incertaine (et à l'échelle de travail, on ne saura du coup pas prendre en considération individuelle ce désordre).

Dans cet esprit, on peut estimer qu'en dehors des désordres connus, d'autres désordres d'ampleur équivalente peuvent survenir sur la même zone homogène, voire même suspecter de manière exceptionnelle et ponctuel d'autres désordres d'intensité plus grande.

De manière pratique et très concrète, ce décalage très probable entre désordres inventoriés et désordres réels amène notamment dans le sous chapitre immédiatement suivant sur les intensités à considérer et de justifier notamment que :

- dans les secteurs à formations gypsifères affleurantes, le niveau d'intensité est estimé par défaut comme modéré au vu des désordres avérés, mais aussi avec suspicion au moins localement d'un niveau d'intensité élevée ;
- dans les secteurs sans formations affleurantes, le niveau d'intensité est estimé par défaut comme limité malgré l'absence de cas de désordres avérés, mais aussi avec suspicion au moins localement d'un niveau d'intensité modérée.

b) Intensité

Pour l'intensité élevée, seuls les zones homogènes de l'**anticlinal Nord** ont connu plusieurs des désordres de cette ampleur (Peyrui, Trou Baou, Sambourette...). Pour une grande partie des compartiments ouest et est, l'intensité moyenne serait plutôt attendue comme modérée, mais on retiendra l'intensité élevée comme valeur majorante globale.

Pour l'intensité modérée, on retrouve quelques exemples de désordres avérés de cette ampleur pour le reste des **secteurs avec des formations gypsifères à l'affleurement** (hors anticlinal Nord). En cas de poursuite de la dégradation des désordres les plus significatifs, des intensités élevées pourraient être ponctuellement atteintes. Au final pour les secteurs de formations gypsifères à l'affleurement (hors anticlinal nord), on retiendra un niveau d'intensité modérée avec localement une suspicion d'intensité élevée.

Pour l'intensité limitée, certains désordres du centre bourg de cette ampleur pourraient être en lien avec de la dissolution du centre bourg, restant au plus de niveau limité.

Sinon ailleurs, aucun désordre n'est signalé mais dans le contexte local (espace rural avant tout, couverture boisée ou sinon couvert végétal, confusion avec des mouvements d'origine karstiques), des désordres d'intensité limitée pourraient être présents (en tout cas attendu) **en pied de butte jurassique, au niveau des fenêtres du plateau Nord**. À noter que comme précédent, dans ces zones homogènes (pied de butte jurassique, fenêtre du plateau) où une intensité faible est considérée comme avérée, des suspicions locales pour une intensité d'un cran au-dessus, soit modérée, sont retenus.

Au niveau **des flancs de buttes jurassiques, flanc de plateau et périphérie des fenêtres**, l'absence de tout désordre avérée même d'intensité limitée pourrait ne pas n'être qu'un biais d'inventaire mais aussi traduire une réalité. Dans la mesure où la dissolution resterait non encore totalement exclue et a minima plausible, les volumes engendrés semblent insuffisants pour venir migrer en surface, mais la possibilité de désordres d'intensité limitée reste considérée pour le scénario suspecté.

Enfin, une intensité négligeable à nulle est retenue pour les secteurs où les formations gypsifères sont les plus profondes (**plateau Nord, cœur des buttes jurassique**) et où la dissolution de gypse n'a pas été retenu comme scénario possible. On notera par contre que ces secteurs peuvent connaître par contre des problèmes de dissolution des carbonates, et donc de possibles effondrements mais là d'origine karstique.

Cette estimation et présentation des niveaux estimés d'intensité peut aussi se formaliser par famille de zones homogènes, et de manière plus synthétique dans le tableau suivant (illustration 126).

c) Prédisposition de base

La prédisposition (Cf illustration 127) est le croisement de deux notions, le gisement et les potentiels hydrogéologiques.

La notion du gisement renvoie directement au contexte géologique et ne pose pas de problème de détermination, surtout ici où les grandes zones homogènes ont été définies sur le seul critère géologique. Le paramétrage associé au gisement (avéré/suspecté) renvoie directement sur les mêmes incertitudes géologiques considérées en termes d'estimation des intensités ou des désordres, bref sur les mêmes deux scénarios de référence retenus pour la détermination de l'intensité juste au-dessus.

Par contre, il reste difficile pour la quasi-totalité des grandes zones homogènes, de se prononcer en dehors de quelques secteurs spécifiques locaux caractérisés lors de la présente étude sur les potentiels hydrogéologiques qui seront donc définis par défaut comme médians (dissolution moyennement active).

Typologie des zones homogènes	Présences des zones de surépaisseurs de gypses en amas	Niveau d'intensité des désordres avérés	Niveau estimé des désordres suspectés	Intensité estimée pour le scénario avéré	Intensité estimée pour le scénario suspecté
Axe Anticlinal Nord	avéré en plusieurs endroits	élevée (amas) ou modérée (aillères) modérée (cas limités assez suspectés bien que non confirmés)	potentiellement élevée partout (amas)	niveau élevé	niveau élevé
Formation gypsifères affleurantes	suspectées ponctuellement		potentiellement élevée par endroits (amas)	niveau modéré	niveau élevé
Fenêtres dans le plateau avec formation gypsifère affleurante à sub-affleurante	non suspectée au regard de l'absence de tout désordre signalé	non observé mais probable quand même au niveau limité au -	potentiellement modérée par endroits (cavitation assez vite évolutif avec le gypse +/- profond)	niveau limité	niveau modéré
Pieds des buttes jurassiques	non suspectée au regard de l'absence de tout désordre signalé	non observé mais probable quand même au niveau limité au -	potentiellement modérée par endroits (cavitation assez vite évolutif avec le gypse +/- profond)	niveau limité	niveau modéré
Fenêtres dans le plateau avec formation gypsifère sub-affleurante	non suspectée au regard de l'absence de tout désordre signalé	non observé mais probable quand même au niveau limité au -	limitée si présent	niveau limité	niveau limité
flancs de butte jurassique	non suspectée au regard de l'absence de tout désordre signalé	Gypse trop profond a priori pour de la dissolution significative	limitées si présent	niveau négligeable à nulle	niveau limité
flancs de plateau jurassique	non suspectée au regard de l'absence de tout désordre signalé	Gypse trop profond a priori pour de la dissolution significative	limitées si présent	niveau négligeable à nulle	niveau limité
Périphérie de fenêtre dans le plateau	non suspectée au regard de l'absence de tout désordre signalé	Gypse trop profond a priori pour de la dissolution significative	limitées si présent	niveau négligeable à nulle	niveau limité
Gypses masqués sous corniches calcaires	non suspectée au regard de l'absence de tout désordre signalé	Gypse trop profond a priori pour de la dissolution significative	limitées si présent	niveau négligeable à nulle	niveau limité
Cœur de butte jurassique	non suspectée au regard de l'absence de tout désordre signalé	Gypse trop profond a priori pour de la dissolution significative	limitée si présent	niveau négligeable à nulle	niveau nul
Plateau	non suspectée au regard de l'absence de tout désordre signalé	Gypse trop profond pour de la dissolution	Gypse trop profond pour de la dissolution	niveau négligeable à nulle	niveau nul

Illustration 126 : Estimation des niveaux d'intensité par famille typologique des grandes zones homogènes

Typologie des zones homogènes	Intensité estimée pour le scénario avéré	Intensité estimée pour le scénario suspecté	Prédisposition estimée pour le scénario avéré	Prédisposition estimée pour le scénario suspecté	Niveau d'aléa pour le scénario avéré	Niveau d'aléa pour le scénario suspecté	Niveau global d'aléa retenu
Axe Anticlinal Nord	niveau élevé	niveau élevé	sensible	peu sensible	élevé	modéré	élevé
Formation gypsifères affleurantes	niveau modéré	niveau élevé	sensible	peu sensible	modéré	modéré	modéré
Fenêtres dans le plateau avec formation gypsifère affleurante à sub-affleurante	niveau limité	niveau modéré	sensible	peu sensible	modéré	modéré	modéré
Pieds des buttes jurassiques	niveau limité	niveau modéré	sensible	peu sensible	limité	limité	limité
Fenêtres dans le plateau avec formation gypsifère sub-affleurante	niveau limité	niveau limité	sensible	peu sensible	limité	limité	limité
flancs de butte jurassique	niveau négligeable à nul	niveau limité	peu sensible	peu sensible	négligeable à nul	limité	limité
flancs de plateau jurassique	niveau négligeable à nul	niveau limité	peu sensible	peu sensible	négligeable à nul	limité	limité
Périphérie de fenêtre dans le plateau	niveau négligeable à nul	niveau limité	peu sensible	peu sensible	négligeable à nul	limité	limité
Gypses masqués sous corniches calcaires	niveau négligeable à nul	niveau nul	sensibilité nulle	sensibilité nulle	nul	nul	nul
Cœur de butte jurassique	niveau négligeable à nul	niveau nul	sensibilité nulle	sensibilité nulle	nul	nul	nul
Plateau	niveau négligeable à nul	niveau nul	sensibilité nulle	sensibilité nulle	nul	nul	nul

Illustration 127 : Détermination des niveaux globaux de sensibilité selon la typologie des grandes zones homogènes concernées.

Typologie des zones homogènes	Scénario de référence avéré	Scénario de référence suspecté	Estimation des potentiels hydrogéologiques avérés	Estimation des potentiels hydrogéologiques suspectés	Prédisposition estimée pour le scénario avéré	Prédisposition estimée pour le scénario suspecté
Axe Anticlinal Nord	gisement avéré	gisement suspecté	médian (par défaut)	médian (par défaut)	sensible	peu sensible
Formation gypsifères affleurantes	gisement avéré	gisement suspecté	médian (par défaut)	médian (par défaut)	sensible	peu sensible
Fenêtres dans le plateau avec formation gypsifère affleurante à sub-affleurante	gisement avéré	gisement suspecté	médian (par défaut)	médian (par défaut)	sensible	peu sensible
Pieds des buttes jurassiques	gisement avéré	gisement suspecté	médian (par défaut)	médian (par défaut)	sensible	peu sensible
Fenêtres dans le plateau avec formation gypsifère sub-affleurante	gisement avéré	gisement suspecté	médian (par défaut)	médian (par défaut)	sensible	peu sensible
flancs de butte jurassique	gisement avéré	gisement suspecté	peu actifs (par défaut)	médian (par défaut)	peu sensible	peu sensible
flancs de plateau jurassique	gisement avéré	gisement suspecté	peu actifs (par défaut)	médian (par défaut)	peu sensible	peu sensible
Périphérie de fenêtre dans le plateau	gisement avéré	gisement suspecté	peu actifs (par défaut)	médian (par défaut)	peu sensible	peu sensible
Gypses masqués sous corniches calcaires	gisement avéré	gisement suspecté	potentiels nuls	potentiels nuls	sensibilité nulle	sensibilité nulle
Cœur de butte jurassique	gisement avéré	gisement suspecté	potentiels nuls	potentiels nuls	sensibilité nulle	sensibilité nulle
Plateau	gisement avéré	gisement suspecté	potentiels nuls	potentiels nuls	sensibilité nulle	sensibilité nulle

Illustration 128 : Estimation de la prédisposition de base par famille typologique des grandes zones homogènes.

Par définition intrinsèque des familles de grandes zones homogènes cœurs de buttes jurassiques et plateau jurassique tels que définis précédemment, la dissolution y est écartée, soit des potentiels hydrogéologiques nulles dans les deux cas de scénario (avéré/suspecté).

Par définition intrinsèque des familles de grandes zones homogènes suivantes, flanc de butte ou de plateau jurassique, périphérie de fenêtre sous le plateau et gypse masqués sous les corniches calcaires, tels que définis précédemment, la dissolution du gypse reste encore envisagée de manière avérée bien que de manière marginale (potentiels peu actifs pour ce scénario) et sinon au niveau standard médian par défaut dans le scénario suspectée (à des potentiels considérés par défaut comme réduits, peu actifs).

Pour le scénario de référence avéré, la **prédisposition de base** est définie comme **sensible pour 5 des 11 familles** (Illustration 127), **peu sensible** pour 4 des 11 familles et sinon **nulle** (les 2 dernières des 11 familles).

Pour le scénario de référence suspectée, la **prédisposition de base** est définie comme **peu sensible pour 9 des 11 familles** (Illustration 127) et sinon **nulle** (6 des 11 familles).

d) Niveau global de sensibilité des zones homogènes

Par croisement du niveau d'intensité estimée et de la prédisposition de base, il est donc possible de déterminer le niveau de sensibilité par typologie de zone homogène telle que résumé dans le tableau précédent (Illustration 128). On retiendra en niveau global de sensibilité le scénario de référence le plus défavorable sachant qu'en général ils sont identiques.

5.2.2. Ajustement local du niveau de sensibilité

Les ajustements locaux des niveaux de sensibilité par rapport aux grandes zones homogènes de base sont de diverses origines et sources listées ci-dessous et qui seront ensuite explicités dans l'ordre de cette liste :

- données ponctuelles (carrières, zones d'affleurement et désordres) ;
- hydrogéologie ;
- hydrographie ;
- interférométrie ;
- dommages aux bâtis.

Ces ajustements locaux traduisent en fait des variations locales au sein de la prédisposition (hydrogéologies, hydrogéologies), ou de l'intensité et plus généralement des deux paramètres à la fois. Les effets des ajustements locaux peuvent de plus interférer entre eux (se cumuler, se soustraire et même se neutraliser).

a) Données ponctuelles (carrières, zones d'affleurement de gypse et désordres)

Il ne sera précisé que les situations ponctuelles où cette donnée isolée peut modifier *in fine* le niveau de base de sensibilité. Les carrières et zones d'affleurement de la Haute Platrière ne sont qu'en partie incluses dans les deux zones homogènes de l'anticlinal nord telles que tracées. Tant pour l'incertitude sur l'extension connue de ces secteurs, de possibles extensions de galeries en souterrain que pour l'évasement latéral des cuvettes d'affaissement et des cratères d'effondrement (zone d'influence), il a été considéré un tampon de 100 m autour des centroïdes

des symboles où **l'intensité est réévaluée plutôt à élevée** et la **prédisposition plutôt à sensible**, soit une **sensibilité de niveau fort**.

De même, les zones d'affleurements de gypse signalés à flanc d'un vallon encaissé à Saint-Michel (au sud immédiat de Sambourette) situé en dehors de la zone homogène de l'anticlinal nord (compartiment ouest) sont réévalués pour les mêmes raisons multiples à un niveau de sensibilité fort.

La quasi-totalité des mouvements de terrain connus sur la commune de Bargemon en lien avec la dissolution du gypse sont déjà situés dans les zones homogènes de l'anticlinal nord mais il existe néanmoins deux désordres significatifs situés dans la zone homogène des formations gypsifères (compartiment ouest) :

- le désordre rue Jean Jaurès en sortie est de centre bourg, où un affaissement des terrains avec poinçonnement d'un mur, présence avérée de gypse à faible profondeur pour partie déjà dissous (vide franc), et dissolution très active caractérisé en aval de la source baptisée Saint Bibiane ;
- le glissement de versant à Estuve associé à la présence avérée de gypse à faible profondeur en partie déjà dissous.

Dans ces deux cas, **l'intensité a déjà atteint ou reste en mesure d'atteindre le niveau élevé** et la **prédisposition** est considérée comme **très sensible**, soit un niveau **de sensibilité fort**.

b) Hydrogéologie (caractérisations ponctuelles des potentiels hydrogéologiques)

Pour quelques secteurs de la commune où les formations gypseuses sont à l'affleurement, il a été possible de caractériser un régime actif de dissolution (ou au contraire de faible activité).

Ces secteurs sont :

- celui du centre bourg à **l'activité hydrogéologique peu prononcée** en surface et qui couvre une partie conséquente du centre bourg (prédisposition de base passant en théorie³⁹ de sensible à peu sensible) ;
- le petit secteur du désordre de la rue Jean Jaurès en aval de la source de Saint Bibiane (déjà citée dans le sous chapitre précédent) avec une **activité hydrogéologique marquée** (prédisposition de base passant de sensible à très sensible ; soit une sensibilité de niveau fort *in fine*) ;
- le petit secteur de la résurgence de la Traverse du Lauron dans le pied de la butte d'appui du village, avec une **activité hydrogéologique prononcée** (prédisposition de base passant de sensible à très sensible ; soit une sensibilité de niveau fort *in fine*) ;
- Enfin, trois secteurs liés au réseau hydrographique (vallon de la Haute Platrière, Vallon de l'Ubac au sud-est de la commune et vallon de Blacon en sortie est du centre bourg, avec une **activité hydrogéologique prononcée** (prédisposition de base passant de sensible à très sensible ; soit une sensibilité de niveau fort *in fine*).

³⁹ Compte tenu ensuite aussi de l'impact des déformées interférométriques (en limite de zone d'influence de l'anomalie du Fond Riou mais essentiellement dedans) et de la suspicion de possible influence locale de la dissolution résiduelle sur les bâtiments endommagés du centre bourg (affaissement au niveau des fondations), la prédisposition finale reste *in fine* sensible (sensibilité restant au niveau moyen)

c) Réseau hydrographique

Par extension des résultats constatés sur 3 des vallons, et au regard de l'encaissement assez marquée et quasi généralisée du réseau hydrographique, il a été considéré que l'activité hydrogéologique sur ce réseau hydrographique est partout considérée à ce stade comme active (soit **une prédisposition finale très sensible** au lieu de sensible⁴⁰), ce qui implique par croisement avec l'intensité, des ajustements locaux du niveau de sensibilité (Illustration 128) :

- sensibilité de niveau moyen porté à niveau **fort** pour les zones homogènes où les formations gypsifères sont à l'affleurement ;
- sensibilité de niveau faible porté à niveau **moyen** pour les zones homogènes en pied de butte jurassiques.

Le réseau hydrographique est indiqué d'après la base de données BDCartage comme possédant pour toutes les petites ramifications de vallon une largeur moyenne représentative de 30 m. Il a été considéré ici un tampon d'influence du réseau hydrographique sur la dissolution de gypse pris forfaitairement à 25 m⁴¹.

Cette prise en compte concerne aussi bien les secteurs de cours d'eau à régime permanent (plus en équilibre physicochimique avec le milieu mais au débit pérenne) que les cours d'eau intermittents (au fonctionnement irrégulier mais moins en équilibre et *a priori* plus ponctuellement agressif), impossibles à ce stade d'être discriminées.

d) Interférométrie

La zone d'anomalie constatée à plus de 4,5 mm/an en altimétrie de moyenne témoigne d'une zone de dissolution très active pour laquelle la **prédisposition est requalifiée de très sensible**, soit dans les zones homogènes concernées (avec les formations gypsifères à l'affleurement), une **sensibilité** requalifiée au final au niveau **fort**. La zone concernée touche le fond du vallon du Riou mais aussi le pied de butte sur lequel s'appuie le village (et qui correspond aussi à la zone transitoire entre le compartiment est et ouest).

Le reste de la butte s'accommode latéralement et de manière de plus en plus atténuée en s'en éloignant, de cette dissolution active en pied (poursuite à minima de la dissolution du gypse un peu plus en profondeur dans la butte mais sans doute d'extension limitée et accommodation mécanique surtout avec petite déformation vers l'aval (avec ou sans fluage en surface). Au niveau du centre bourg (zone à faible dissolution en surface), on observe encore des mouvements atténués mais qui restent situés surtout entre 2,5 et 3,5 mm/an de tassement et pas loin d'un mm/an en déplacement vers l'est. Si on ajoute les effets des dommages au bâti, et les probables possible fuite sur les réseaux et canalisations diverses, la **prédisposition sur le centre bourg** est réévaluée au final comme plutôt **sensible** (malgré les potentiels hydrogéologiques *a priori* favorables), et le niveau de **sensibilité** reste évalué à moyen.

On notera qu'ailleurs de cette anomalie et de sa zone d'influence périphérique bien contrastée dans le secteur bâti (bourg), on observe aucune tendance particulière ailleurs avec des intensités bien plus hétéroclites, notamment sur l'anticlinal nord, étendu à des espaces au bâti bien plus

⁴⁰ Pour des intensités suspectées, la prédisposition passe du coup de peu sensible à sensible, soit une augmentation d'un niveau de sensibilité sauf dans le cas des flancs de butte flancs de plateau, où le niveau de sensibilité reste à faible (Cf illustration 127)

⁴¹ Sans conditionner ce tampon à d'autres facteurs, comme l'encaissement du cours d'eau, la pente du lit.....

diffus et relativement boisés, il n'y a guère que la zone du plateau Nord où le signal interférométrique apparaît très plat, indicateur d'un espace particulièrement stable sur la période suivie (2015-2020).

e) Dommages aux bâtis

Cette autre signal indirect, potentiellement indicateur des mouvements de terrain, est apparu dans la majorité des cas plutôt en anticorrélation du signal interférométrique (par exemple les maisons intactes situées sur le flanc sud de la butte du village alors que les déformées interférométriques sont relativement marquées et constantes), bien plus hétéroclites et dispersées que les rendus interférométriques.

Cet indicateur seul ne permet donc pas au final d'influer ni sur la prédisposition de base ni sur le niveau d'intensité (pas d'ajustement possible du niveau de sensibilité). C'est donc associé à d'autres indicateurs que le niveau de sensibilité peut être modulé comme déjà explicité ci-dessus pour le cas du centre bourg.

Il y a juste un petit secteur en aval immédiat du pied de butte jurassique et en limite du centre bourg, au niveau du lotissement du Clos dans un petit espace triangulaire, où un faible signal interférométrique (1 à 1.8 mm / an) se conjugue avec absence de dommage aux bâtis. Cette zone n'a pas d'écoulements de surface ou émergence signalée et elle reste donc non caractérisée d'un point de vue hydrogéologique (mais elle avoisine la zone du centre bourg qualifiée hydrogéologiquement de peu active). Dans ce petit secteur où tous les indicateurs sont favorables, la **prédisposition** retenue au final est **peu sensible** et cette petite zone locale sera réévaluée au niveau **de sensibilité faible** (plutôt que le niveau initial moyen).

5.3. CARTE DE SENSIBILITÉ RÉSLTANTE

Au final, la sensibilité mouvement de terrain liés à la dissolution du gypse tel qu'estimée au vue des connaissances actuelles, se répartit (Illustration 129 et illustration 130) comme suit :

- zones soumises à sensibilité : 55,9% du territoire communal réparties comme suit :
 - niveau fort couvrant 5,61 ha, soit 14,7 % du territoire communal,
 - niveau moyen couvrant 8 ha, soit 22,7 % du territoire communal,
 - niveau faible couvrant 6,52 ha, soit 18,5 % du territoire communal ;
- zones non concernées par la sensibilité : 44,1 %.

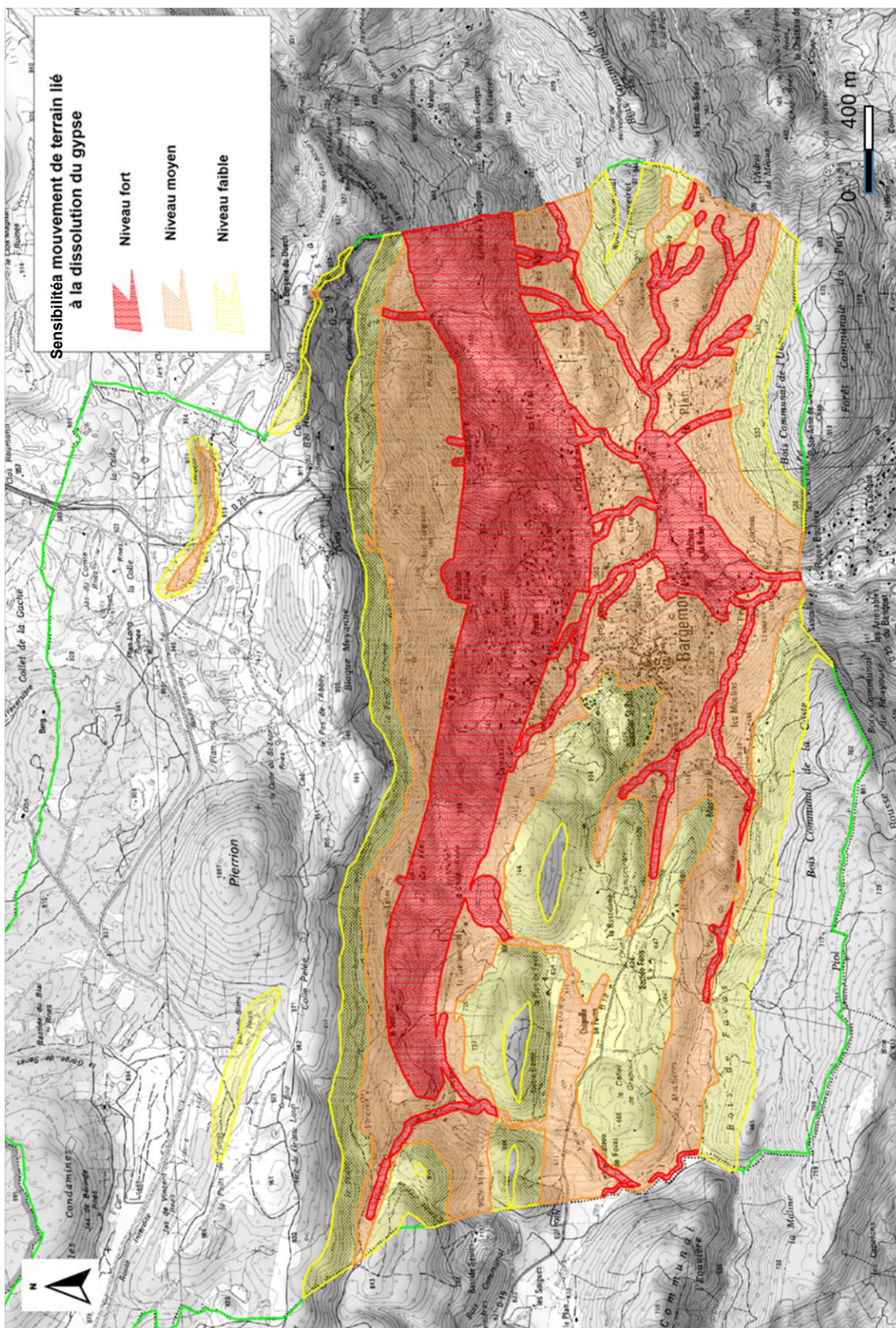


Illustration 129 : Zonage de la sensibilité mouvement de terrain lié à la dissolution de gypse sur la commune de Bargemon (Var) à l'échelle 1/25 000 (Source fond de carte : Scan 25 IGN).

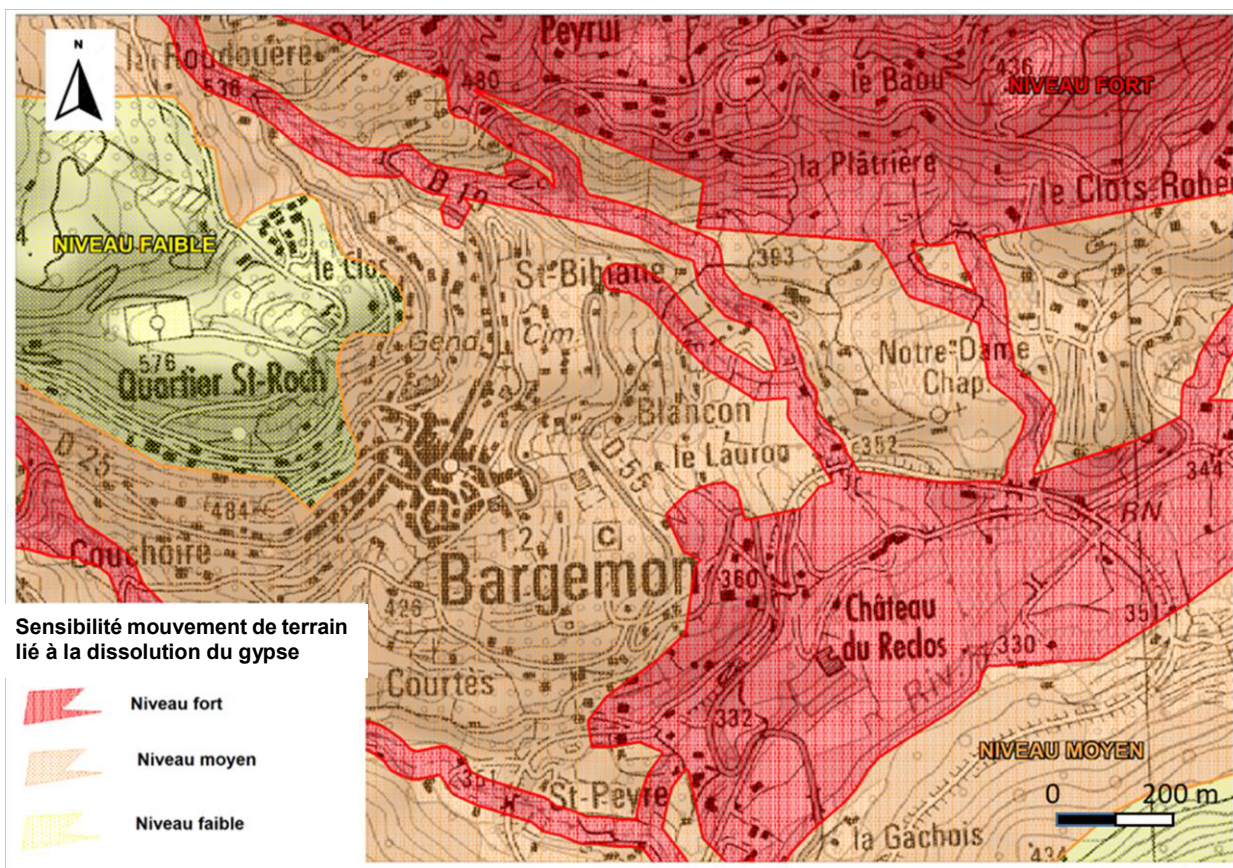


Illustration 130 : Zoom à hauteur du centre bourg sur le zonage de la sensibilité mouvement de terrain lié à la dissolution de gypse sur la commune de Bargemon (Var) (Source fond de carte : Scan 25 IGN).

Le croisement des zones de sensibilité définies avec le bâti (1503 bâtiments indifférenciés inventoriés dans la BDTopo de l'IGN) est proposé (Illustration 131) :

Répartition des enjeux bâtis par niveau de sensibilité	Nombre de bâtiments concernés	Bâtiments concernés en %
en sensibilité forte	403	26,8 %
en sensibilité moyenne	978	65,1 %
en sensibilité faible	115	7,7 %
hors sensibilité	7	0,5 %

Illustration 131 : Nombre de bâtiments concernées par niveau de sensibilité sur la commune de Bargemon (83).

On note dans ce cas :

- bâtiments concernés par la sensibilité : 99,5 % répartis comme suit en zone de sensibilité :
 - de niveau fort 26,8 % du parc bâti communal,
 - de niveau moyen 65,1 % du parc bâti communal,
 - de niveau faible 7,7% du par bâti communal,

Le bâti en zone de sensibilité moyenne prédomine (65 % du parc bâti communal) à l'instar de ce qu'on l'on observe à hauteur du centre bourg (Illustration 130).

6. Recommandations

Au regard de l'ensemble des analyses faites dans cette étude, ce chapitre présente une synthèse des recommandations dites de « bon sens » à destination de la Mairie pour mieux gérer le problème de dissolution du gypse sur la commune de Bargemon, et éviter les phénomènes de tassement pouvant générer des effondrements et entraîner des désordres. La justification de ces recommandations étant détaillée au chapitre 4.1.

En termes de recommandations préliminaires issues des investigations hydrogéologiques, l'étude a mis en évidence des actions prioritaires et fortement recommandées : dans la mesure où les sources et écoulements aériens du centre-bourg présentent une légère influence de la dissolution du gypse, cela signifie qu'ils interagissent déjà naturellement avec la formation du Keuper sur laquelle le village est installé. Il est nécessaire de s'assurer que ces écoulements n'interagissent pas davantage avec les formations du Keuper en évitant toute fuite des réseaux d'eau de la commune (eau potable, eaux usées, eaux pluviales) et en entretenant l'ensemble des canaux et caniveaux assurant l'évacuation des eaux vers l'aval du village. En outre, il est recommandé de réaliser **un inventaire exhaustif de l'ensemble des écoulements historiques du village** et à **les cartographier avec précision**. La connaissance précise de ces écoulements et leur origine est primordiale pour pouvoir entretenir les structures et éviter l'infiltration de l'eau.

Il apparaît pertinent de pouvoir **suivre la dynamique de dissolution du gypse** par des analyses chimiques d'eau régulières à l'échelle de la commune dans le but de pouvoir identifier les changements d'activité hydrogéologique des massifs et ainsi prévenir les désordres. Les sources suivantes sont jugées les plus représentatives pour la mise en place d'un tel suivi :

- **Source du Clos** en priorité (facilité d'instrumentation) pour disposer d'un suivi dans le centre-ville ;
- dans un second temps la **source du Vallon de Notre Dame** (Intérêt = potentiellement représentative du flanc impacté par les effondrements (couloir N110)) ;
- dans un second temps également la **source de la Traverse du Lauron**.

Ces deux dernières sources présentent des configurations d'émergence qui rendent l'instrumentation complexe à réaliser. Leur suivi en continu représente cependant un enjeu vis-à-vis de la nécessité de suivre la dynamique des émergences saturées en gypse pour tenter d'anticiper la survenance de tout nouveau désordre voire effondrement majeur dans le secteur situé entre Sambourette et Campaouré.

Concernant la zone spécifique du désordre de la rue Jean Jaurès, au pied de la source Ste Bibiane, il est indispensable de **canaliser les eaux de la source** pour stopper leur réinfiltration. La réinfiltration de ces eaux constitue en effet un moteur à la dissolution du gypse présent à faible profondeur sous la route. Ces eaux doivent être canalisées vers le réseau d'eau pluvial (étanche) qui lui-même ne doit plus être évacué vers le flanc du vallon car il est susceptible d'être constitué de gypse également.

Une synthèse de l'ensemble des recommandations est ainsi faite dans les paragraphes suivants, partant du plus général jusqu'à des actions spécifiques.

6.1. RECOMMANDATIONS GÉNÉRALES

En cas de survenue d'un **fort épisodes pluvieux**, il conviendra :

- d'organiser les jours suivant l'épisode de pluie des tournées d'inspections pour identifier tout changement sur la commune concernant les écoulements d'eaux superficielles, et les désordres (bâti, mouvements de terrain...) ;
- de capitaliser les observations par écrit (date, observateur, localisation et descriptions des observations ou RAS).

En dehors des périodes de forts épisodes pluvieux, il est recommandé :

- par défaut, de faire ce travail de reconnaissance au moins une fois par an ;
- de capitaliser les informations par écrit (date, observateur, localisation et descriptions des observations ou RAS).

L'information de la population est une action primordiale pour mieux gérer le phénomène, il s'agira plus précisément :

- d'informer sur le phénomène en se référant par exemple au Guide Gypse (2016), aux informations disponibles sur différents sites Internet dédiés : l'Observatoire Régional des Risques Majeurs en PACA (ORRM PACA) : <http://observatoire-regional-risques-paca.fr/>; le portail Géorisques : <https://www.georisques.gouv.fr/> ; ou via le Document d'Information sur les Risques Majeurs (DICRIM) disponible sur l'ORRM, etc. ;
- d'informer sur les indices à repérer sur le terrain, dans les jardins, sur les maisons, pour les faire remonter en Mairie (écoulements d'eau, débuts d'affaissements, fissures sur le bâtiment, etc.).

6.2. GESTION DES EAUX SUPERFICIELLES

Concernant la gestion des eaux superficielles les recommandations vont porter :

Sur les **réseaux de distribution de l'eau potable, eaux usées, eaux pluviales**, avec comme action :

- d'éviter toutes fuites sur les réseaux ;
- de rénover et entretenir les réseaux de manière régulière.

Sur le **réseau de canaux historiques**, il est recommandé d'assurer une gestion des eaux circulant dans ces canaux aériens et souterrains (caves) pour irriguer les jardins en :

- les inventorier de manière systématique et exhaustive ;
- les rénovant pour les étanchéifier au maximum.

Concernant **les sources**, il est recommandé :

- d'assurer une vigilance en détectant très tôt tout changement suspect de régime d'écoulement et de venues d'eau aux alentours, et les conséquences associées (ravinements, ...) ;
- de faire un suivi de la minéralisation de plusieurs sources :
 - à court terme (prioritaire) : la source du Clos (*a priori* facile à réaliser) ;
 - à plus longs terme : la source du vallon de Notre Dame (la plus pérenne) mais difficile à mettre en place et la source de la Traverse du Lauron sous le village, également

difficile à mettre en place avec probablement la nécessité de réaménager l'émurgence pour la suivre au-dessus de la route et non en-dessous).

6.3. SUIVI/SURVEILLANCE DES DÉSORDRES (À COURT MOYEN TERME)

Ce suivi et cette surveillance vont concerner :

Les bâtiments, avec comme recommandations :

- l'entretien courant des bâtiments sans exception ;
- la réalisation d'un diagnostic structurel des bâtiments déjà endommagés ;
- le suivi des fissuromètres déjà en place, et la nécessité d'en poser sur des bâtiments montrant déjà des fissures s'ils ne sont pas présents ;
- d'inspecter les caves, surtout dans le centre du village, pour détecter les venues d'eau anormales ;
- de s'assurer de l'absence de nouveaux désordres, et si de nouveaux désordres sont observés, la population doit en informer la mairie.

Les sols, avec comme recommandations :

- de détecter tout indice de début de tassement et de suivre son évolution ;
- de détecter tout nouvel effondrement ;
- de mettre en œuvre des suivis de déplacement (par interférométrie INSAR) ;
- de poursuivre des mesures interférométriques en continu, au moins jusqu'à un nouveau cycle de saturation des versants, permettrait de savoir à court terme si la dissolution continue bien de ralentir ;
- de mettre en œuvre des mesures sur des cibles topographiques (une dizaine environ répartie sur le village et suivies mensuellement par exemple pendant 2 ans pour un calage avec le suivi des déplacements INSAR et analyse comparative.

6.4. INVESTIGATIONS COMPLÉMENTAIRES (À PLUS LONG TERME)

Pour améliorer la modélisation structurale géologiques 3D des couches gypsifères sous le centre bourg (d'abord puis dans la zone de transition entre compartiments est et ouest), et pour le repérage au moins partiel des couches de gypse résiduel, il est recommandé de réaliser des **forages** sur les parcelles concernées pour améliorer la connaissance sur la cartographie des lentilles ou couches de gypse, et leur géométrie (épaisseur et localisation). Pour le cas de la butte où est construit le village, cela permettra de mieux comprendre également les amplitudes de l'accommodation latérale des versants. Ces forages devront faire l'objet de diagraphies (notamment : gamma naturel, diagraphie de résistivité, diagraphie sonique, micro moulinet, diagraphie de l'eau) en plus des échantillonnages géologiques classiques (carottés et/ou cuttings)

Un peu plus globalement, et vu les niveaux de sensibilité conséquents, la réalisation d'un véritable **drainage de surface** avec un réseau de collecteurs amont et des drains éventuels de part et d'autres de la butte du village serait à envisager.

7. Conclusions et perspectives

La commune de Bargemon est concernée par les problèmes de dissolution du gypse depuis de nombreuses années, avec de nombreux événements analysés et décrits dans ce rapport, notamment l'effondrement en 1992 du Peyrui et auparavant de Favas (il y a environ 100 ans) ou la formation du « trou de Jubille », et enfin depuis les années 1970, des désordres structuraux atteignent certains bâtis du cœur de village.

Le risque effondrement--affaissement associé au phénomène de dissolution de gypse a donc été étudié sous un angle pluridisciplinaire dans un objectif de bâtir une stratégie globale de gestion du risque sur la commune de Bargemon et d'améliorer la connaissance du phénomène pour proposer des solutions adaptées.

La connaissance sur les événements d'effondrement sur le secteur de Bargemon est riche et plusieurs études ont été réalisées sur ces phénomènes naturels depuis plus d'une vingtaine d'années, en particulier depuis l'effondrement du Peyrui en 1992, dans l'objectif de mieux comprendre ce qui l'avait provoqué. L'analyse bibliographique associée aux descriptions d'événements montre bien les difficultés rencontrées pour détecter la présence de gypse en sous-sol (dans les niveaux du Keuper et Muschelkalk), et prévenir les conséquences de sa dissolution en surface avec la formation d'affaissements, d'effondrements voir de glissements de terrain, et les désordres aux bâtis associés.

Le travail réalisé en géophysique a apporté de nouveaux éclairages, notamment pour la géologie. Le contexte géologique et structural favorable à la survenue d'événements comme celui du Peyrui a été confirmé et clarifié : l'accumulation de gypse sous l'effet de plis anticlinaux conjuguée à de la fracturation favorisant l'infiltration d'eau. Dans le village de Bargemon, la géophysique a permis d'écarter certaines hypothèses quant à l'origine des dommages observés sur les bâtiments. Plus globalement, la géophysique a permis de faire avancer et d'orienter la réflexion tout au long de l'étude sur les secteurs à investiguer en priorité ou non, et a en particulier guider le choix de localisation des forages.

Même si des progrès certains ont été apportés en géologie sur les formations gypsifères du Keuper et leur organisation structurale (e.g. alignement orienté N110 des principales masses de gypse et des fontis déjà connus ou nouvellement découverts), il demeure encore de grosses incertitudes sur la géologie (1) en surface (faute d'affleurements visibles), et (2) surtout en profondeur (faute de forages profonds) pour pouvoir spatialiser à minima les horizons de gypse. C'est néanmoins sur cette base qu'une cartographie de zones homogènes (36 au total) a été établie sur le principe simple que plus le gypse est profond, plus il est protégé des eaux sous saturées percolant depuis la surface, moins il est susceptible d'être dissous. Cette analyse a fait ressortir clairement des secteurs clés qui guident la cartographie de sensibilité.

En complément un volet très développé sur la compréhension hydrogéologique des systèmes présents a été mis en œuvre avec recensement de sources, suivi de débits, mesures chimiques *etc.* Ce point est essentiel. En effet, rappelons que le gypse étant une roche soluble, pour qu'un processus de dissolution se mette en place, il faut donc que le fluide qui est en contact avec le gypse soit sous-saturé. Pour garantir la sous-saturation de ce fluide au cours du temps et par conséquent le maintien du processus de dissolution, il est nécessaire que l'écoulement de ce fluide soit suffisant pour le renouveler régulièrement au contact de la roche solide contenant le gypse.

La cartographie de sensibilité s'est basée sur l'évaluation d'une intensité du phénomène redouté (dimensions des mouvements de terrain avérés les plus significatifs), et d'autre part sur la prédisposition à l'apparition du phénomène (croisant la typologie du gisement de gypse avec les potentiels hydrogéologiques). Ensuite, il a été tenu compte d'ajustements locaux des critères de sensibilité ou d'intensité en fonction des contextes particuliers (carrières, zones en mouvement, présence de réseau hydrologique recoupant les unités définies, etc.).

Au final, la sensibilité mouvement de terrain lié à la dissolution du gypse tel qu'estimée au vue des connaissances actuelles, se répartit comme suit :

- zones de niveau fort couvrant 5,61 ha, soit 14,7 % du territoire communal ;
- zones de niveau moyen couvrant 8 ha, soit 22,7 % du territoire communal ;
- zones de niveau faible couvrant 6,52 ha, soit 18,5 % du territoire communal ;
- 44,1 % du territoire communal n'est pas concerné par la sensibilité mouvement de terrain lié à la dissolution du gypse.

Si on observe la répartition du bâti dans ces zones de sensibilité, 99,5 % du bâti communal est soumis à une sensibilité à des niveaux variables et une grande majorité (65,1 %) est située en zone de sensibilité moyenne (à l'instar de ce qu'on l'on observe à hauteur du centre bourg).

Sur la base des connaissances acquises au cours de cette étude, une synthèse des recommandations est proposée pour mieux gérer et appréhender le risque de dissolution du gypse sur la commune de Bargemon : informer sur le risque et ses conséquences, améliorer la connaissance, prévenir les désordres, agir sur les facteurs aggravant les phénomènes de dissolution et surveiller les zones sensibles identifiées.

8. Bibliographie

AGAP (1992) - Géophysique Appliquée - Code de bonne pratique.

Arvois R., Cova R., Durozoy G., Gouvernet C., Olivo C. (1969) – Étude hydrogéologique du nord-est varois. Rapport BRGM 69-SGL-295-PRC. 78 p., 12 fig., 19 ann.

Cairon D. et Dellery B. (1990) – Périmètre des terrains soumis aux risques naturels à Bargemon (83). Rapport BRGM/R 31793 PAC 4S 90. 15 p.

Caron J.-P. et al. (1972) - Carte géologique de la France (1/50 000), feuille Toulon, 2^{ème} éd., BRGM, Orléans.

Caron J.-P. (2011) - General outlines of the Muschelkalk and Keuper of Provence. *In* Triassic of Southeast France (Provence: Var & Alpes-Maritimes). M. Durand, J.-P. Caron & H. Hagdorn eds.

Caron J.-P. (2018) - Le Permien et le Trias inférieur, *in* Villeneuve *et al.*, Mémoire explicatif, Carte géol. France (1/50 000), feuille Aubagne-Marseille, 3^{ème} édition (1044), pp. 27-39.

Celle, H. (2000) - Caractérisation Des Précipitations Sur Le Pourtour De La Méditerranée Occidentale –Approche Isotopique Et Chimique. PhD Thesis. Université d'Avignon.

Charmoille A., Lecomte A. (2014) - Évaluation de l'aléa « mouvements de terrain » lié aux mécanismes de dissolution dans le sous-sol, INERIS DRS-14-135671-00258A.

Charmoille A., Lecomte A., Kreziac C. (2018) - Dissolution naturelle du gypse dans le sous-sol - Analyse et Gestion des aléas mouvements de terrain de type affaissement et effondrement liés aux mécanismes de dissolution naturelle du gypse dans le sous-sol. Guide Ineris et Cerema. 34 p.

Cova R. (1992) - Commune de Bargemon. Effondrement de terrain quartier Peyrui, DDAF, décembre 1992.

Cova R. et Pont H. (1995) - Commune de Bargemon. Effondrement du Peyrui. Evolution depuis 1992, DDAF, DDE, mai 1995.

Craig H. (1961) - Isotopic variations in meteoric waters. Science 133, 1702–1703.

Daupley X., Laouafa F., Billiotte J., Quintard M. (2015) - « La dissolution du gypse : quantifier les phénomènes », Mines et Carrières, Hors série, pp. 35-43.

Des Garets E. (2002) - Rapport BRGM SGR/PAC-83

Dufour D. (2013) - Histoire de Bargemon de la naissance du village au 19^e siècle, imprimerie Dufour à Auxi-le-Château.

Durozoi G., Gouvernet Cl. (1966) – Structure géologique de la zone d'éboulement de Callian (Var) – Rapport BRGM/DSGR.66.A2. 21 p.

Durville, J.-L., Potherat, P. (1994) - Département du Var, commune de Bargemon, Effondrement du Peyrui, rapport du LCPC, avril 1994.

ERG (2020) - RD19-PR21+030 Rue Jean Jaures (Bargemon, 83). Diagnostic géotechnique complémentaire. Dossier n°20SG221AaGEGCTCB.

Fiolet F. (2000) - L'étude de l'instabilité d'un versant en milieu méditerranéen, l'exemple du versant de Bargemon (Var), Mémoire de Maîtrise de Géographie Physique, Université de Picardie Jules Verne.

Geotomo Software (2019) - RES2DINVx64 ver. 4.09 with multi-core and 64-bit support.

Gonzales G. (1988) – Plan d'exposition aux risques naturels de Tourrettes (Var) – Rapport technique – Analyse des risques géologiques. Rapport BRGM /88SGN765PAC. 22 p.

Guiennet, B. (1997) - Effondrement de terrain à Bargemon, quartier Peyrui, interprétation du suivi topographique de septembre 1992 à février 1997, CETE méditerranée.

Julian M., Nicod J. (1990) – Catastrophes naturelles et risques afférents aux terrains gypseux (Alpes et Provence). Revue de géographie alpine. Tome 78 n°1-3, pp. 157-173.

LCPC-CETE d'Aix-en-Provence (1996) - Etude photo-interprétative appliquée à la détection de zones à effondrements potentiels. Le Trias provençal de Fayence à Draguignan (Var), rapport de recherche

Lebourg T. et Zerathe S. (2013) – Glissements de grande ampleur sur le front subalpin : du fluage au collapse rocheux. Hypothèse d'une crise gravitaire Et Analyse des risques d'effondrement dans le secteur Grassois. Présentation.

LERIT Expertise (2011) – Rapport d'expertise géotechnique - Secteur angle des rues Marceau et Maurel, Commune de Bargemon (83830). 63 p.

LERIT Expertise (2011) – Note pour demande de mesures conservatoires - Secteur angle des rues Marceau et Maurel, Commune de Bargemon (83830). 63 p.

LERIT Expertise (2014) – Rapport d'expertise géophysique n°2 – Secteurs en amont et en aval des rues Marceau et Maurel, chemin du Clos / Place Chauvier, Commune de Bargemon (83830). 172 p.

Leroi E. (1992) – Effondrement de Bargemon (Var), utilisation du kit d'urgence d'auscultation. Rapport BRGM/R 35894. 71 p.

Loke, M.H. (2020) - RES2DINVx64 ver. 4.10. Geotomo Softw. SDN BHD - Aarhus GeoSoftware.

Loke, M.H. (2000) - Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies : A practical guide to 2-D and 3-D surveys.

Marçot N., Mirgon C., Arnal C., Mathon C., Genois J.-L., Verrhiest-Leblanc G., Champion H. et Spinousa N. (2016) – Gestion et prévention du risque mouvements de terrain lié à la présence de gypse en PACA – Guide à l'usage des Maires.

Marescot, L. (2008) - Imagerie électrique pour géologues : acquisition, traitement et interprétation.

Mennessier G. et al (1966) - Carte géologique et notice de la feuille de Fayence, n°998, BRGM.

Nicod J. (1967) – Recherches morphologiques en Basse Provence calcaire. Gap, Ed. Louis-Jean, 557 p.

Pan-European Correlation of the Triassic (2011) - 8th International Field Workshop, September 4-8, 2011, 9-12.

Pothérat P., De la Chapelle M., Guiennet B., Besson C. (1996) - Etude photo-interprétative appliquée à la détection de zones à effondrements potentiels. Le Trias provençal de Fayence à Draguignan (Var), CETE, DDE, LCPC.

Pothérat P. (1997) - Étude par photo-interprétation des phénomènes d'effondrement liés à la dissolution du gypse, Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées, 209, mai-juin 1997, pp. 69-81.

Quémart P., Pothérat P., De La Chapelle M. (1997) - Détection par photo-interprétation de zones potentielles d'effondrements liées aux cavités souterraines dans le gypse. CETE Méditerranée et LCPC. 38 p., 6 ill., 2 ann.

Rapport de constatation (2009) - PV 01/06/2009 – Commune de Bargemon, Service de la Police rurale – Objet : affaissement de maisons de village présentant un danger pour la sécurité publique.

Rapport de constatation (2010) - PV 01/01/2010 – Commune de Bargemon, Service de la Police rurale – Objet : travaux pour garantir la sécurité publique non réalisés par les propriétaires des immeubles menaçant ruine, rue Marceau et rue François Maurel.

Rivet F., Mathon C. (2011) – Désordres sur des immeubles de la commune de Bargemon – Analyse du rapport d'expertise géotechnique du bureau d'études L.E.R.I.T. et recommandations, Rapport final. Rapport BRGM/RP-60536-FR. 77 p., 4 ill.

Rivet F., Girard A. et Mathon C. (2012) - Carte régionale de l'aléa d'effondrement/glisement lié à la présence de terrains gypseux triasiques en région Provence-Alpes-Côte d'Azur, rapport BRGM/RP-60896-FR.

Robain, H., Bobachev, A. (2017) - X2IPI : user manual.

Théveny A. (2010) – Rapport d'expertise Ingénieur E.I.M. Numéro d'expertise 1002680-9. 26 p.

Zerathe S. (2013) - Origine et évolution des ruptures gravitaires de grande ampleur dans les chaînes subalpines méridionales à l'Holocène Contraintes géomorphologiques, géochronologiques et géophysique, Thèse dirigée par Thomas LEBOURG, UNIVERSITE DE NICE - SOPHIA ANTIPOLIS – UFR SCIENCES École Doctorales des Sciences Fondamentales et Appliquées.

Sites Internet

Données Européennes EGMS (European Ground Motion Service) :
<https://egms.land.copernicus.eu/>

Observatoire Régional des Risques Majeurs (ORRM PACA) :
<http://observatoire-regional-risques-paca.fr/>

Géorisques :
<https://www.georisques.gouv.fr/>

Géoportail :
www.geoportail.fr

Annexe 1

Description des événements d'effondrement, d'affaissement et de glissements de terrain potentiellement liés à la dissolution du gypse, sur Bargemon et aux alentours

Effondrement du Baou (Clot Robert, fin XIXe siècle)

D'après Fiolet (2000), le Muschelkalk et le Keuper, connus pour être très plastiques sont deux niveaux de décollement de la couverture par rapport à la structure, ce qui a permis la remontée de gypse sous forme de diapir par effet de bourrage, d'où la forte présence de gypse dans la commune de Bargemon. Au Clots Robert, notamment cette remontée de gypse peut s'observer dans l'une des parois de l'effondrement du Baou.

Le trou du Baou est l'effondrement le plus important du versant. Il se situe en contrebas de la RD 19 à environ 1,5 km du centre du village en direction de Seillans. Il daterait de la fin du 19^e siècle. Il mesure 250 à 300 mètres de diamètre à son bord, le fond fait un peu plus de 100 mètres. Cet effondrement, comme tous ceux du versant, prend la forme d'une dépression à bords abrupts: le fond, humide, est à 436 mètres d'altitude, le bord le plus haut, au nord, est à environ 520 mètres. Les parois sont très raides et donnent une impression d'écrasement. Au sud, subsiste une espèce de levée de terre de plusieurs mètres de haut, limite inférieure de l'effondrement.

Cet effondrement se trouve dans du Muschelkalk supérieur (t2c sur la carte géologique), il est composé de dolomie mais aussi de gypse. Or à Bargemon, le Muschelkalk correspond à un mont dérivé localisé au Clots Robert, séparé des autres structures par deux failles orientées nord/sud. Cet endroit, du fait de son appartenance à un anticlinal correspond à un bourrage de gypse. Ce bourrage est attesté par la coupe dans le gypse, déjà abordée en première partie qui montre un pli chaotique caractéristique d'une remontée. Cet énorme effondrement semble s'être produit dans ce même gypse.



Effondrement du Baou, flanc Est, source BRGM (06/12/2021).

Sources Pothérat (1996) et témoignage de la mairie de Bargemon.

Cet effondrement se situe d'après la carte géologique au 1/50 000 sur du Keuper : argiles rouges, gypse, dolomies et cargneules t6-7 et du Muschelkalk supérieur dolomitique t5-D.

Effondrement des Adrets, fin XIXe siècle

D'après Fiolet (2000), cet effondrement daterait également de la fin du siècle dernier (Pothérat *et al.*, 1996). Il se situe juste en contrebas de la RD 25 à 560/570 mètres d'altitude et à environ 200 mètres au nord de l'effondrement du Peyrui. Il est de taille réduite, sur la carte, il n'est pas visible : il ne forme pas une dépression circulaire comme celui du Baou mais une structure en arc de cercle d'une trentaine de mètres de diamètre. Avant 1965, une dépression en forme de doline de dix mètres de profondeur était encore visible, mais, de petite taille, elle a pu être comblée et aménagée en terrasse. Seule subsiste la paroi abrupte qui est maintenant boisée. L'effondrement s'est produit dans du Keuper recouvert d'une couche épaisse d'éboulis. A aucun endroit la roche en place n'affleure.

D'après la BDMVT, le diamètre de la cavité formée était de 50 m.

Sources Pothérat (1996) et témoignage de la mairie de Bargemon.

Cet effondrement se situe d'après la carte géologique au 1/50 000 sur du Keuper t3 et du Muschelkalk supérieur dolomitique t2c.

Effondrement du Peyrui 22 août 1992

Le 22 août 1992 à 6h, un effondrement de 80 m de diamètre et de 15 m de profondeur se produit dans le quartier du Peyrui à Bargemon, entre la RD19 et la RD25. Un volume d'environ 33 000 m³ de matériaux s'est effondré, et la surface affectée est d'environ 3 200 m². Aucune victime ne fût à déplorer, mais un périmètre d'exclusion fût établi afin de mettre en sécurité les habitants, entraînant l'évacuation d'une dizaine de personnes, par mesure de précaution. Aucune surveillance n'est réalisée à l'heure actuelle. En effet, l'effondrement est situé entre deux routes départementales desservant un secteur pavillonnaire gravement menacé par les possibilités d'extension du phénomène. Cela a conduit à l'acquisition de six biens sinistrés sur le site du Peyrui par le Fonds Barnier suite à l'effondrement du 22 août 1992 (évolutif jusqu'en 1995).

D'après Fiolet (2000), le fond de l'entonnoir d'effondrement se situait à dix mètres par rapport à la surface antérieure dans sa partie aval et 35 mètres en contrebas de sa partie amont. Cet effondrement s'est effectué dans un secteur composé de marnes du Keuper recouvertes d'une importante coulée d'éboulis (au nord de l'effondrement, des épaisseurs d'éboulis de 50 m ont été relevées). Aucun affleurement rocheux n'est visible.

La présence d'eau n'est pas très visible : dans le secteur du Peyrui et au pied de la corniche de la Blaque Meyanne, il n'y a pas de source importante, une source et des émergences temporaires sont visibles dans le vallon de St Bibiane. En revanche, l'écoulement souterrain est certainement plus important et constitue la cause principale de dissolution du gypse: les eaux se perdent probablement dans les éboulis et rejoignent les couches imperméables du Keuper. Les sondages, effectués par la DDAF, ont montré la présence d'une nappe de versant à 25 mètres de profondeur, l'écoulement est donc souterrain, ce qui favorise l'expansion de cavités souterraines. L'écoulement souterrain n'est pas le seul facteur favorisant la création de cavités, il y a aussi beaucoup le rôle de la fracturation.

Cet effondrement a complètement déstabilisé le versant en amont menacé dorénavant de grands risques de glissement, conséquence de l'appel au vide.

Trois épisodes marquants sont relevés au cours de l'évolution

- de 1992 à mai 1995 : Fiolet décrit en 2000, que au cours de l'année 1993, le fond de l'entonnoir s'est relevé de 3 m par effet de comblement suite à la déstabilisation des bords par érosion régressive. En novembre 1993, suite à de fortes précipitations (un mois d'octobre très arrosé: 333,6 mm de façon continue: 20 jours de pluie en plus des 48 mm lors de la première décade de novembre), un soutirage de l'entonnoir se produisait, le fond s'abaissait de 7 m ; les pluies ravinèrent les pentes et 15 000 m³ furent alors engloutis. L'effondrement n'a plus bougé jusqu'au 25 avril 1995 où un soutirage de 20 000 m³ eut lieu, toujours au détriment des bords qui s'élargissent; le fond s'abaisse à la cote 465. Un premier bilan peut s'établir : de 1992 à mai 1995, le fond de l'entonnoir s'est abaissé de 15 m, le diamètre est passé de 70 à 90 m; enfin, le volume du vide a doublé, passant de 33 000 à 70 000 m³. Ces agrandissements sont principalement liés aux fortes précipitations, ils peuvent aussi être accentués par des secousses sismiques comme en avril 1995 où le nouvel effondrement s'est produit 4 jours après un séisme niçois ressenti dans la région. Mais ils peuvent simplement être le fruit du tassement des matériaux de remplissage de la cavité ou les conséquences d'effondrements de cavités encore plus profondes. Dans tous les cas, ces mouvements sont brutaux et imprévisibles ;
- de 1995 à mai 1997, l'effondrement n'a pas évolué brutalement comme de 1992 à 1995. Seuls des mouvements lents ont été observés. Ces mouvements ont eu pour cause l'instabilité en amont de l'effondrement. Globalement ils prenaient la direction du cratère (phénomène d'appel au vide). Les premières traces d'instabilité ont été relevées sur la RD25, quelques 250 m en amont de l'effondrement : des fissures et tassements sont apparus. Ils se sont accentués entre novembre 1995 et janvier 1996. Ils traduisent soit le début de la déstabilisation du versant entre l'effondrement et la route: érosion régressive, soit l'amorce d'un nouvel effondrement. Les bords de l'effondrement sont toujours marqués par des fissures avec des décrochements de 30 à 50 cm sur 10 m en arrière du trou. Cette évolution est normale et se poursuivra jusqu'à ce que les bords de l'entonnoir aient atteint une pente d'équilibre (environ de 30°). Il est à noter que les bords n'ont pas évolué brutalement alors que l'hiver 1995-1996 fut très humide, notamment les mois de décembre où il est tombé 163 mm d'eau principalement les deux dernières décades et surtout le mois de janvier où il est tombé 467,1 mm en 22 jours. Les précipitations ne sont donc pas forcément la principale cause d'agrandissement de l'effondrement mais peuvent le préparer par une dissolution accélérée ;
- la situation en 1999 ne montre aucun agrandissement brutal qui se serait produit depuis 1995. Les fissures sur le bord de l'entonnoir se sont agrandies. Elles se situent uniquement sur le bord ouest et peuvent se trouver jusqu'à 15 m de distance du bord de l'entonnoir au niveau de la nouvelle maison de J.F. Porre. Les plus importantes sont au nord-ouest, elles prennent une allure de « pelure d'oignon ». En 1999, il n'est pas rare d'observer des décrochements de 60 cm, un décrochement de 93 cm a même été observé.

Six ans après les faits, le versant n'est toujours pas stabilisé. Le fond de l'effondrement n'a pas bougé depuis quatre ans, il est possible que la cavité se soit comblée de façon solide, mais cette hypothèse est loin d'être certaine, car les tassements et effondrements sont comme nous l'avons dit souvent imprévisibles. Le plus préoccupant est l'érosion régressive autour de l'entonnoir : les bords ne cessent de s'élargir surtout à l'ouest; les premiers signes de déstabilisation ont été relevés sur la RD 25, 250 m au nord. Si cette évolution continuait, un énorme glissement pourrait alors se produire. Le seul moyen de stopper l'érosion régressive serait le comblement de l'entonnoir pour réduire le phénomène d'appel au vide. Solution simple

et évidente mais toujours pas appliquée car elle pose d'autres problèmes, humains, financiers cette fois-ci.

Le 2^{ème} exemple se localise sur la RD 19 au niveau du Peyrui. Ces travaux sont bien entendu une des conséquences de l'effondrement d'août 1992. Les études qui ont suivi ont montré que le toit de la cavité n'était qu'à dix mètres sous la route. La circulation sur la RD 19 pouvait à long terme provoquer son effondrement. Il fut décidé par sécurité de fermer la route dans l'attente d'une solution. Cette solution fut, sur une longueur de 80 m environ, de restructurer la route en enlevant ses fondations puis en comblant les vides apparents et de reconstruire la route avec une structure souple faite de géotextiles pouvant accuser des déformations sans toutefois casser le revêtement de la route. Solution efficace puisque cinq ans après les travaux, la route ne montre aucun signe de faiblesse.

Les dimensions observées début des années 2000 montrent une cavité de 30 m de profondeur et 90 m de diamètre et le volume de l'entonnoir d'effondrement est de 70 000 m³.

D'après (Pothérat, 1997), à l'emplacement du trou du Peyrui, une structure circulaire, visible sur les photos de 1979, est située à l'intersection de deux discontinuités d'azimuts N10-20° E et N160-170° E également détectées par les méthodes géophysiques. Un effondrement s'est donc déjà produit à cet endroit. Il s'agit vraisemblablement d'un phénomène polycyclique : la direction de la contrainte régionale principale n'ayant pratiquement pas varié depuis la phase majeure alpine : raccourcissement « Z » nord-sud, les fractures subméridiennes sont toujours restées ouvertes et on s'accorde à penser que les processus de dissolution/effondrement ont joué de façon pérenne depuis plus de 10 millions d'années (anté-Vindobonien).

La dissolution du gypse du Muschelkalk moyen et du Keuper, rapide dans un premier temps en raison de sa forte solubilité, a présidé au large développement d'un karst dont l'effondrement du toit a entraîné la formation de brèches calcaires et dolomitiques du Muschelkalk supérieur ou des terrains surincombants, ainsi que nous le voyons dans l'ancienne carrière de la plâtrière située à quelques centaines de mètres plus à l'Est où des brèches polygéniques comblent une ancienne cavité de dissolution intra-gypseuse (Immédiatement au nord et à l'est de l'effondrement de 1992, deux structures circulaires bien marquées coïncident avec des anomalies gravimétriques négatives et doivent faire l'objet d'une grande attention).

D'après le rapport (Leroi, 1992), l'examen des photographies aériennes antérieures au phénomène montre que le site correspond à un ancien vallon, propice à la concentration des eaux.

Au cours des 50 dernières années, de nombreuses modifications du réseau de drainage superficiel, et par conséquent souterrain, sont intervenues dans le secteur.

L'ancienne exploitation de gypse avait été implantée sur l'exutoire d'un bassin versant relativement important ; l'existence d'un ancien collecteur de gros diamètre, collecteur actuellement obstrué, en est la preuve ; de plus, la route actuelle est construite sur un remblai constitué en partie par les résidus d'exploitation de la carrière ; or il existait par le passé un pont à la place de ce remblai, pont qui enjambait un cours d'eau pérenne. L'obstruction de l'exutoire est d'ailleurs confirmée par le fait que, les eaux se concentrent derrière l'exploitation et se mettent en pression dans le versant à la suite d'orages violents.

Plusieurs hypothèses sur le mécanisme de rupture de l'effondrement du Peyrui peuvent donc être avancées :

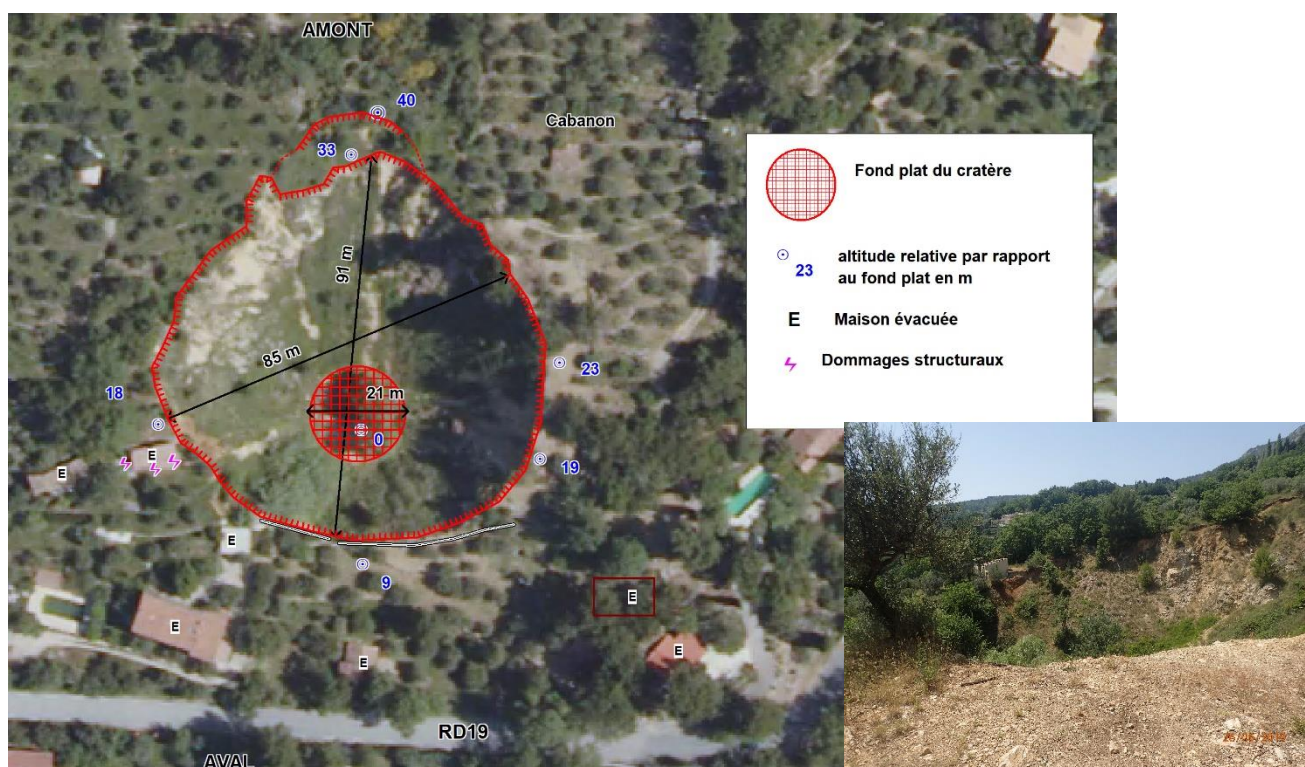
- suite aux orages et aux pluies importantes survenues le week-end précédant l'effondrement, les eaux auraient continué à éroder les parois d'une cavité en équilibre précaire, et les éboulements successifs, auraient conduit à une déstabilisation de l'ensemble ;
- dans le second cas, les eaux issues des mêmes orages, se seraient accumulées dans une cavité préexistante, et un phénomène de vidange rapide dû à un « débouillage » de l'exutoire aurait provoqué un appel au vide conduisant à l'effondrement du toit de la cavité. L'eau libérée aurait-elle alimenté un cours d'eau existant ? Se serait-elle perdue dans d'éventuelles cavités connexes ?

Aujourd'hui, au démarrage de l'étude sur Bargemon (juin 2019), le fontis du Peyrui a été décrit de la manière suivante :

La pente du versant est régulière et proche des $15^{\circ 42}$.

Le dimensionnement du fontis d'effondrement a été fait à l'aide d'un distancemètre laser.

Le cratère en surface du versant est de forme sensiblement circulaire voire elliptique.



Effondrement de Peyrui vu en plan

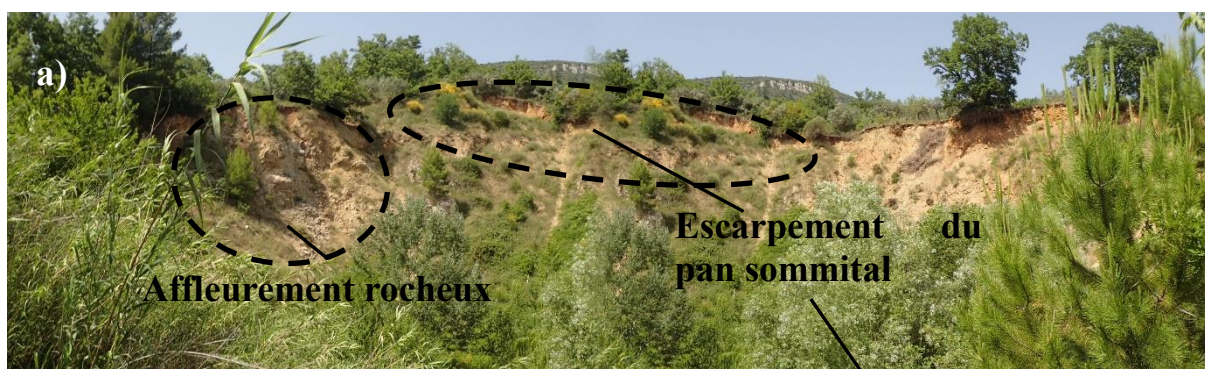
⁴² 24 m de dénivelé pour 91 m de longueur horizontale mesurée en bord de cratère soit un angle de $14,7^{\circ}$ arrondi à 15°

Il fait 94 m comme distance maximale⁴³ (dans son axe +/- dans le sens de la pente) et 84 à 88 m dans l'axe opposé. Sa surface² est d'environ 6 200 m⁴⁴ (on retiendra au final la valeur de 6 200 m² avec en valeurs d'axes elliptiques 92 m de longueur et 86 m de largeur).

Le fond du cratère quasi circulaire est plat pour un diamètre de 20 à 21 m (soit une surface d'environ 360 m²). Les flancs de versant ont des profils réguliers droits ou légèrement concaves, constitués majoritairement de terrains meubles. Sur le flanc ouest, les flancs se verticalisent davantage à la faveur d'affleurements rocheux. Sur le flanc est, un chemin a été coupé net.



Fond plat du cratère de Peyrui avec présence de blocs éboulés depuis les flancs.



Maison endommagée



⁴³ 91 m en distance horizontale et 24 m en distance verticale.

⁴⁴ Compte tenu de l'obliquité de cette surface à 15 °, on peut comparer avec la surface projetée à l'horizontale (contours dessinés sous SIG) et on obtient un écart (incertitude) de moins de 5 % (ça colle assez bien).

Vue des flancs de cratère de Peyrui amont depuis l'aval (a), depuis le flanc est vers le sud-ouest (b) et le flanc nord-est (c) depuis le flanc sud-ouest.

En prenant le fond du cratère comme altitude relative nulle, il a été reporté les altitudes en bordure du cratère qui s'échelonnent de 9 à 33 m (en bleu sur l'illustration).

En amont du cratère principal, on a un pan de près de 340 m² (bande courbe de plus de 40 m de longue sur un peu plus de 8 m de largeur moyenne) qui présente en tête un front d'escarpement de 5 à 6 m de haut. La tête d'escarpement est à l'altitude relative de 40 m.

Les observations et mesures faites sur le terrain le 26 juin 2019 ont permis de calculer le volume de fontis.

Les pentes moyennes sur les flancs du cratère s'échelonnent de 27 ° coté aval à plutôt 34 ° coté amont.

Pour une pente moyenne de flanc prise de 30°, la hauteur (profondeur) PF du cône tronqué d'effondrement sous le fond plat D_f est déterminé comme suit :

$$\tan 30^\circ = \frac{D_f}{PRF}$$

On a donc une profondeur Prf proche de 11,5 à 12 m.

En réalité, les flancs du cône sont partout avec une légère concavité, ce qui rapproche sensiblement la profondeur du cône tronqué de la surface, sans doute plus proche de 10,11 m que de 12 m.

Si on tient compte du remplissage de fond du cratère (sa partie tronquée), le cône d'effondrement est un cône oblique (15°) à base légèrement elliptique. Au centroïde de la base elliptique c, l'altitude relative du point H_{zc} peut être estimée comme voisine des 23 à 25 m. Le dénivelé H_z entre l'origine du cône et la base elliptique est donc 25+ Prf, soit 35 m.

La hauteur du cône h, compte tenu de l'oblicité de 15° est de

$$h = H_z \cos 15^\circ = \cos 15^\circ * (H_{zc} + PRF)$$

Soit h ≈ 33,8 m.

Le volume du cône oblique V_{obli} est déduite de sa hauteur et de la surface de sa base :

$$V_{obli} = \frac{h}{3} * Surface$$

Soit V_{obli} ≈ 69 950 m³.

Le comblement du fond de cratère est un cône de base surface proche de 1 300 m² et de hauteur d'environ 10 à 11 m, soit un volume V_{fond} d'approximativement 1 200 m³ (+/- 50 m³).

Pour le pan en tête de 340 m², éboulé en moyenne de 3 m, le volume correspondant de l'affaissement de la surface de ce pan de sol V_{pan} est d'environ 1 000 m³.

Au final, le volume du cratère d'effondrement V_{Peyrui} est donc estimé⁴⁵ être égale à :

$$V_{\text{Peyrui}} = V_{\text{obl}} - V_{\text{fond}} + V_{\text{pan}}$$

Soit un volume du cratère d'effondrement de Peyrui d'environ 69 750 m³.

Il ne semble pas qu'il y ait eu d'évènements significatifs depuis 1995.

Et si on considère que les matériaux au sein du cratère se sont foisonnés à 10 % (valeur plutôt faible), le volume initial du vide par dissolution de gypse était donc au final d'un peu plus de 75 000 m³.

Aux abords du fontis, 7 maisons ont été évacuées autour du cratère. Un examen rapide a été fait de ces anciens enjeux bâtis. Seule une maison proche du flanc sud-ouest du cratère a été repérée comme endommagée et cela depuis le début : les dégâts structuraux y sont aujourd'hui sans équivoques avec des ouvertures de fissures centimétriques à pluri centimétriques pour les fissures les plus importantes. Un mur maçonné dans le prolongement côté ouest de cette maison, également fissuré dès le début, a une ouverture qui atteint actuellement les 10 cm.



Fissuration affectant la maison coté sud-ouest, Peyrui.

⁴⁵ Si le talus naturel du versant avant effondrement n'est pas régulier, mais déjà excavée (ancien front de taille de carrière par exemple), il conviendra de soustraire de l'estimation du volume du cône d'effondrement celui du volume déjà excavé dans le versant avant effondrement.



Fissuration ouverte dans le mur en prolongement ouest de la maison endommagée et maison abandonnée restée intacte, Peyrui.

Sur les autres maisons non atteintes *a priori*, des marques à la peinture sur les façades pointant vers les toitures laissent penser que celles-ci ont pu avoir été suivies sans doute par interférométrie satellitaire.

L'effondrement du Clos d'Ausselet (fin du 19^e siècle)

Cet effondrement daterait également de la fin du siècle dernier. Il se situe à 630 mètres d'altitude. Il ne possède pas une forme aussi distincte que celui du Baou, il s'agit aussi d'une dépression circulaire de très grande taille, le fond est également humide et semble faire une centaine de mètres de diamètre. En revanche, les parois ne sont pas abruptes. Comme les autres effondrements, en dehors du Baou et d'après la carte géologique, cet effondrement se situe dans du Keuper et est recouvert d'une épaisse couche d'éboulis. De la même façon que le Peyrui, cet effondrement pourrait être un karst polyphasé : il s'est effectué en plusieurs temps dans les différentes couches sous-jacentes du Muschelkalk et du Keuper, d'autant qu'en amont se sont déjà produits des effondrements qui ont modifié la pente du versant. Cet effondrement s'est encastré dans ceux préexistants sur la paroi nord et en la modifiant. C'est pourquoi nous n'avons pas cette impression d'écrasement que nous trouvons au Baou. Néanmoins, le rebord sud est toujours visible, il forme une levée de terre d'environ quelques mètres par rapport à la dépression.

L'affaissement lié au glissement de l'Estuve

D'après Fiolet (2000), le glissement de l'Estuve revêt un caractère spécial puisqu'il est le fruit de la combinaison de deux manifestations de l'instabilité : il marie à la fois un **glissement de terrain** et un **affaissement lié au gypse**. Ce glissement se situe sur la RD25 en direction de Callas à 750 m du centre du village et à 470 m d'altitude. Il a eu lieu le 13 février 1975 entraînant avec lui un mur de pierres sèches ainsi que la route. Comme les autres glissements il se localise dans des marnes du Keuper et à proximité d'écoulements d'eau : il se situe entre deux vallons très proches de quelques dizaines de mètres dont un à écoulement permanent. Des sondages ont montré la présence de gypse. De plus, le puits à la base du mur Peller, recueillant les eaux de drainage, présente des eaux blanchâtres, fortement chargées en sulfates (380 mg/l) c'est-à-dire en gypse dissout. Mais la présence de gypse aggrave encore l'instabilité, cette fois sous la forme

d'effondrements ou d'affaissements: la forte présence d'eau dissout le gypse et crée des cavités: le **sondage SP 1 du 18 mai 1993** laisse supposer la présence d'une cavité entre 6,4 et 7 mètres de profondeur car ce niveau est constitué de marnes noires altérées et de gypse blanc et rose. En amont de ce glissement, il existe des cavités dans la couche de gypse qui risquent de s'effondrer. Ceci prouverait qu'il y a une relation certaine entre les glissements et les affaissements, le dénominateur commun serait bien entendu le gypse. Les aménagements effectués ont stoppé le glissement entamé mais ne peuvent empêcher l'affaissement lié au gypse et au matériel en vrac ayant servi au comblement de 1975, affaissement qui se poursuit inlassablement. L'affaissement mesure environ dix mètres de diamètre et occupe les trois quarts de la route.

Cet événement correspond à un glissement ayant débuté en 1966 mais se réactivant de façon récurrente, dans le quartier de l'Estuve. Le volume de matériaux mobilisés est d'environ 200 m³, il s'agit d'une vaste zone en mouvement.

Ce mouvement de terrain occasionne des dommages au réseau routier (RD25 au PR19) et des fissures sur les ouvrages en amont de la RD25.

La précision de sa localisation est décamétrique.



Observation du site concerné par le glissement de l'Estuve (2019).

Sources BDMVT : Carte informative issue de BRGM R 31793 PAC 4S 90-CAIRON / DELLERY-Périmètre des terrains soumis aux risques naturels à Bargemon Application du R111.3.

Cet effondrement se situe d'après la carte géologique au 1/50 000e sur du Keuper : argiles rouges, gypse, dolomies et cargneules t6-7.

L'affaissement lié au glissement « du jeu de boule » (1990)

D'après Fiolet (2000), ce glissement est très semblable à celui de l'Estuve. Il se trouve au droit de la décharge municipale, le long de la RD19 vers Seillans non loin d'un vallon, toujours sur les marnes gypseuses du Keuper. Il forme un affaissement de forme semi-circulaire sur la route. Plus petit que le précédent, de quelques mètres de diamètre, il n'occupe que la moitié de la chaussée. Celui-ci n'a pas bénéficié d'aménagement particulier, seule est visible cette rupture semi-circulaire. Mais, suite à l'effondrement du Peyrui de 1992, non loin de là, des sondages ont été effectués dont un sur la RD19 à moins de 250 mètres de ce glissement. Ce sondage a montré la présence de gypse à une vingtaine de mètres de profondeur. **Ce glissement serait donc**

probablement semblable à celui de l'Estuve : un mouvement complexe, une combinaison de glissement de terrain et d'affaissements et d'effondrements.

Dans la BDMVT, le glissement de remblais sur les argiles et marnes triasiques a eu lieu en 1990 sur la RD19 au PR19 (précision kilométrique). Les causes sont essentiellement anthropiques (terrassment et rupture de conduite d'eau).

Source : DDT Subdivision de Draguignan.

Cet effondrement se situe d'après la carte géologique au 1/50 000e sur du Keuper : argiles rouges, gypse, dolomies et cargneules t6-7.

L'affaissement rue Marceau et rue Maurel (depuis les années 1970)

Rivet et Mathon (2011) ont décrit des désordres structuraux atteignant certains bâtis du cœur de village depuis les années 1970 (habitations des rues Marceau et Maurel, chapelle) et s'aggravant depuis 2009. Des mouvements d'enfoncement et de basculement des immeubles sont observés.

Ces désordres menacent directement la structure de plusieurs immeubles du centre-ville. Les habitations concernées ont fait l'objet d'arrêtés de péril imminent en 2011. Les lézards observées sur les façades montrent un mouvement d'affaissement des immeubles, dans les rues Marceau et Maurel. Ailleurs dans le centre-ville, des fissures sont observables sur de nombreux bâtiments, notamment autour des fenêtres. Celles-ci peuvent traduire un phénomène général de tassement des immeubles. La chapelle située rue Marceau, présente également un état de fissuration avancé.

Les investigations géotechniques et géophysiques menées par le bureau d'études LERIT en 2011 ont montré que les immeubles reposent sur des terrains déconsolidés et susceptibles de renfermer des vides souterrains (anomalies géophysiques) à faible profondeur (moins de 10 m).

Cet effondrement se situe d'après la carte géologique au 1/50 000 sur du Keuper t3.

Le glissement du Duech (1980-2000)

Le glissement du Duech n'est pas à proprement parlé un glissement, mais plus exactement une zone de multiples mouvements de terrain : glissements rotationnels ou loupes de solifluxion. Cette zone se situe à la limite Est de la commune de Bargemon sur le versant Est du vallon du Duech. Elle s'étend sur au moins 350 m de large et 250 à 500 m le long du versant. Cette zone n'est pas homogène : on peut y distinguer un grand glissement rotationnel, classique, et une multiride de petits mouvements de terrain constituant des loupes de solifluxion (Fiolet, 2000).

D'après la BDMVT, cet événement est décrit comme un éboulement se réactivant de façon récurrente entre 1980 et 2000 près de la RD25 au PR12 et affectant le réseau routier. Des travaux ont été réalisés en 2001 et 2002 (ancrage passif, filet, purge).

Source BDMVT : DDE subdivision Draguignan + ERG 95/O/174/GE/9348-SIMONEAU 1995 + CETE 41.2771.41-COLAS 1988

Cet effondrement se situe d'après la carte géologique au 1/50 000e sur du calcaire plus ou moins dolomitique j3-(1).

L'effondrement de Turrettes (27 décembre 1987)

D'après Pothérat (1997), le trou de Tourrettes est situé sur une fracture nord-sud empruntée par le ruisseau du Chautard.

Nicod décrit en 1990 que le 27 décembre 1987, au bas de Tourrettes (une dizaine de km à l'Est de Bargemon), un gouffre s'est ouvert dans le lit d'un ruisseau, le Chautard ; il a rapidement atteint 50 m de profondeur (pour un diamètre d'environ 30 m) ; le ruisseau d'engouffrait dans la cavité.

Puis Leroi (1992) parle de la rivière Chautard comme étant à l'origine de la dissolution des matériaux marneux, et donc de l'affaissement, et qui avait disparu dans un véritable puits profond de plusieurs dizaines de mètres.

Gonzales en 1988 décrivait que l'accident du Chautard, survenu le 27 décembre 1987, résultait de l'effondrement d'une masse de terrain à l'aplomb du lit de la rivière. Il s'est formé un trou profond de 45 m qui a atteint en une semaine une trentaine de mètre de diamètre, et qui, dans le même temps, a entraîné la perte totale et momentanée du Chautard. Par la suite, l'accumulation de matériaux a provoqué l'établissement d'un bouchon peu perméable, qui a permis au Chautard de reprendre son cours normal. Une série d'investigations (prospection gravimétrique et électrique, sondages de reconnaissance) a été menée de janvier à juin 1988, dans le cadre de l'élaboration du PER, et avec la participation du Département et de la commune, au titre de la sécurité des personnes et des biens, et ce, afin de préciser l'origine et la structure de l'effondrement.

Suite à cette phase de prospection, une interprétation a été proposée par les Services géologiques de la Direction Départementale de l'Agriculture et de la DDE du Var (compte-rendu de réunion du 31/08/1988). Il en ressort les points suivants :

- l'effondrement s'est produit à la faveur du vide existant, tant au niveau du karst Muschelkalk, situé à une profondeur supérieure à 40 m qu'au niveau des gypses du Keuper, situé au-dessus ;
- cet effondrement s'inscrit dans une zone beaucoup plus vaste, qui, par le passé, a subi des phénomènes de même nature (dissolution du gypse, écroulement des calcaires du Muschelkalk) ;
- il existe toujours des vides sous le bouchon comblant le trou ;
- la stabilité du bouchon ne semble pas assurée, et une nouvelle perte du Chautard avec érosion des bords du trou est à craindre ;
- à proximité du trou, il existe des zones où le Keuper contient toujours des niveaux à gypse».

La BDMVT décrit un effondrement qui s'est produit près de la rivière du Chautard en décembre 1987 (précision : communale). Le diamètre de la dépression est de 20 m et sa profondeur 50 m. Des dommages ont été causés aux biens (bâti individuel) mais aucune victime n'est à déplorer. Une vingtaine de personnes a été évacuée.

Sources BDMVT : LCPC, DRM et DDE 83.

Cet effondrement se situe d'après la carte géologique au 1/50 000e sur du Keuper t3.

Glissement de terrain à Bibiane à Bargemon (1980)

Il s'agit d'un glissement qui a eu lieu en 1980, dans le vallon de Bibiane. C'est une réactivation d'un glissement ancien à flanc de vallon, au PR18 de la RD25. Des travaux ont été réalisés : tranchées drainantes et enrochement.

La précision XY serait de 100 m.

Sources BDMVT : DDE subdivision de Draguignan.

Cet effondrement se situe d'après la carte géologique au 1/50 000 sur du Keuper t3.

Eboulement de Saint-Roch à Bargemon (date inconnue)

Il s'agit d'un éboulement dans une zone karstifiée de 100 m³ dans le quartier Saint-Roch, avec un volume unitaire maximal de 5 m³. Il a engendré un recul de 5 m et les blocs se sont propagés sur 4 m de dénivelé. La précision serait décimétrique.

D'après la photo, la lithologie ressemble à celle rencontrée sur le terrain le 26 juin 2019, au niveau d'une cavité, à environ 200 m de distance.



À gauche : Photo de l'événement de Saint-Roch prise le 26/06/2019 © BRGM – À droite : Photo prise le 26/06/2019 près de la base de loisirs à l'entrée d'une cavité dans une formation semblable, éboulement de Saint-Roch.

Sources BDMVT : visite de terrain BRGM et CG_Var-M.Cova.

Cet effondrement se situe d'après la carte géologique au 1/50 000 sur du Bajocien j1 et du Keuper t3.

Événement de Montferrat (date inconnue)

Un effondrement s'est produit dans le quartier Sainte-Anne à Montferrat, à une date inconnue. La précision est décimétrique. Les dimensions de cet effondrement sont les suivants : 50 m de diamètre et 10 m de profondeur.



Photo du site de l'effondrement de Montferrat © BRGM (2002).

Sources BDMVT : Visite de terrain BRGM, Rapport E des Garets 2002 (SGR/PAC-83).

Cet effondrement se situe d'après la carte géologique au 1/50 000e sur du Keuper t3.

Affaissement à Figanières (1991)

Il s'agit d'un affaissement lent et régulier ayant eu lieu en 1991, à l'intersection de la RD54 et de la RD154 (précision décamétrique). Les dimensions de l'affaissement sont de 3 m de diamètre et 2 m de profondeur. Des travaux de remblaiement ont été réalisés.

Sources BDMVT : IGA_1 –G. COLAS– (SGR/PAC-83) et visite terrain SGR.

Cet effondrement se situe d'après la carte géologique au 1/50 000 sur du Keuper t3.

Effondrement à Figanières le 15 juin 2010

Cet effondrement s'est produit le 15 juin 2010 suite à de fortes précipitations, au lieu-dit les Périères, près du collège, en-dessous de la route, en arrière du mur en enrochement (précision métrique).

La chaussée s'est effondrée par départ de fines en arrière du mur en enrochement (semelle sous-cavée).

Sources BDMVT : LR-Aix (CETE Med 106000412).

Cet effondrement se situe d'après la carte géologique au 1/50 000 sur du Keuper t3.

Effondrement à Châteaudouble (1978)

Un effondrement a eu lieu en 1978, au lieu-dit Rebouillon (précision décamétrique), près de la RD955. Le diamètre de la dépression formée est de 50 m et la profondeur est de 15 m. Il s'agit d'une réactivation d'effondrement.



Photo du site de l'effondrement de Châteaudouble © BRGM (2002).

Sources BDMVT : Rapport E des Garets 2002.

Cet effondrement se situe d'après la carte géologique au 1/50 000 sur du Muschelkalk supérieur dolomitique t2c.

Effondrement à Ampus le 30 janvier 1996

Cet effondrement s'est produit le 30 janvier 1996 au lieu-dit Les Adrechs (précision décamétrique). Il affecte le terrain sur un diamètre de 10 m et une profondeur de 2 m. Un arrêté de péril imminent a été pris. L'effondrement a probablement été provoqué par la dissolution des horizons gypseux (sources repérées), avec fissures concentriques larges jusqu'au CC (?).

Il existe un risque induit de mouvement d'ampleur dans le versant (glissement amont signalé pouvant être en relation).



Illustration 1 : Photo du site de l'effondrement à Ampus © BRGM (2002).

Sources BDMVT : DDAF 01/96 –M. Cova – quartier des Adrechs-glissement de terrain et effondrement-avis géologique préliminaire + visite terrain BRGM 6 août 2002.

Cet effondrement se situe d'après la carte géologique au 1/50 000e sur du Keuper t3.

Effondrement à Claviers en 1987

Cet effondrement s'est produit en 1987, près de la RD425, au lieu-dit Les Arrosables du Banquet. Il a été totalement remblayé (avec des voitures, qui ont disparu par la suite avec la réactivation du fontis). Ce fontis s'est réactivé le 15 décembre 2015. D'après les mesures de terrain, la cuvette d'effondrement occupe un volume compris entre 1500 et 2000 m³. La fond est ennoyé, mais sur une faible profondeur *a priori*. Les dimensions de la dépression sont de 20 à 25 m de diamètre et de 5 m de profondeur.

Le point sur la BDMVT est un peu décalé par rapport au trou visible actuellement (environ 40 m).

Sources BDMVT : témoignage mairie, visite de terrain BRGM.

Cet effondrement se situe d'après la carte géologique au 1/50 000 sur du Keuper t3.

Au démarrage de l'étude sur Bargemon, l'effondrement de Claviers a pu être expertisé et décrit de manière plus précise. Les observations ci-dessous datent du 26 juin 2019.

Cet effondrement est situé dans deux parcelles D146 et D147 enherbées quasi planes, enclos et d'accès interdit.

La clôture n'est en fait plus cadenassée (hors service mais laissé tel que pour son côté dissuasif), il a été possible d'accéder au site. Ce fontis s'est en fait réactivé depuis 2003 (date d'occurrence inconnue) et un nouveau cône d'effondrement est présent dans son état actuel. Il a pu être mesuré comme suit.

L'actuel cratère d'effondrement a là encore une forme de cône tronqué à base elliptique de grand axe 32 m et de petit axe environ 12 à 14 m. Le fond du cratère est ennoyé sous une lame d'eau à la cote qui ne semble peu profonde estimée de 2 m au plus, avec un fond relativement plat.



Photo prise avant la réactivation du fontis à Clapiers (date et source ?).



Effondrement de Clapiers: photos prises par la DDTM83 le 16/12/2015 à gauche et le 14/01/2016 à droite.

Si on prend cette lame d'eau comme altitude de référence, les terrains alentours autour du cratère sont à une cote d'environ + 5 à + 6 m (soit le fond du cratère à la cote - 2 m environ).

Côté est, la berge est (sauf à ses extrémités nord et sud) étalée à pente douce et sans ligne d'arrachement bien visible. Sauf à ces extrémités, la berge sud est quasi verticale dans sa partie centrale.

La berge ouest est marquée (sauf à son extrémité sud-est par une série de 2 à 3 lignes d'escarpement successives avec des décalages verticaux de 50 cm voire parfois plus (dans les parties où elles sont rapprochées, les bandes de versant intermédiaire sont de largeur métrique. La RD425 est côté est distante de la ligne d'escarpement la plus externe de 7 / 8 m (pas de signes d'instabilités).

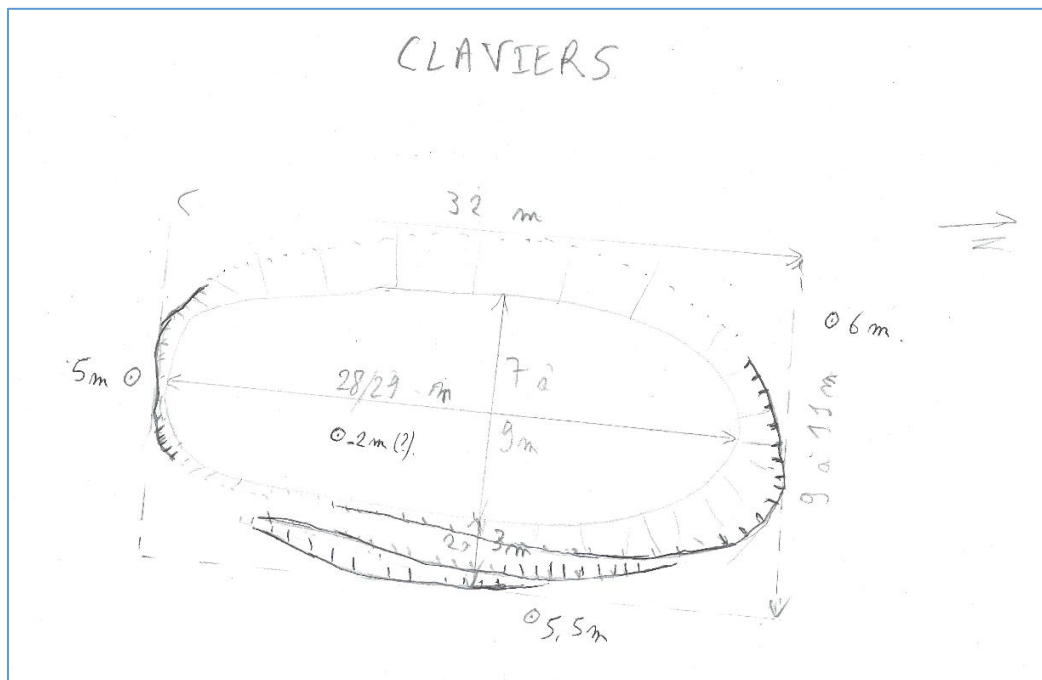


Schéma du cratère d'effondrement de Claviers.



Rive est et sud du cratère ennoyé de Claviers

Côté nord, ces lignes d'escarpement finissent par n'en faire plus qu'une, ceci en net retrait de la berge où la pente se raidit (jusqu'à un peu plus de 45° au maximum). Une serre (d'allure abandonnée) s'approche sur son extrémité sud d'un peu moins de 3 m de cette ligne d'escarpement.

Le cratère d'effondrement a la forme d'un cône tronqué à base elliptique.

Compte tenu du rétrécissement de 4 m sur l'axe principale (32 à 28 m) sur la hauteur totale du cratère (8 m) et de 2 m sur l'axe secondaire (de 10 à 8 m), le sommet (origine) du cône tronqué est donc à l'altitude de $h = -58$ m ou $h' = -34$ m.



Lignes d'escarpements en paliers ouverte de la rive ouest et rive nord, effondrement de Claviers.

Le volume du cône d'effondrement V_{fon} est égal à la différence de volume du cône de surface Cs et du cône sous le fonds remblayé du cratère Cr .

$$V_{fon} = V_{Cs} - V_{Cr} = h_1/3 * \pi(l_1^2 * L_1/4 - h_2/3 * \pi(l_2^2 * L_2/4)$$

Avec $h_1 = 64$ m ; $l_1 = 10$; $L_1 = 32$; $h_2 = 56$; $l_2 = 8$; $L_2 = 28$, on obtient un volume de fontis d'environ $2\,100\text{ m}^3$. Pour $h_1 = 40$ et h_2 de 32 , on obtient un volume de fontis de $1\,475\text{ m}^3$.

Le volume de vide créé par dissolution de gypse depuis 2003 (réactivation du cratère remblayé) est avec un taux de foisonnement de 10 %, proche des $1\,600$ à $2\,300\text{ m}^3$ (soit en moyenne entre 100 et $150\text{ m}^3/\text{an}$, ce qui est loin d'être négligeable).

L'ennoiment actuel du fond du cratère ne peut que favoriser une dissolution rapide du gypse et une activité forte en terme d'effondrement. En effet, si on considère une venue d'eaux de ruissellement externe (eau douce) depuis l'amont (même que temporaire) dans ce plan d'eau (depuis le nord-ouest par exemple ?) et un possible point de rejet en aval des eaux enrichies en saumures jusqu'à saturation (exutoire non repéré en tant que tel lors de la visite. Par débordement coté sud-ouest ??), le processus de dissolution ne pourra que perdurer jusqu'à disparition quasi complète du gypse sous-jacent. Le comblement par remblai n'apparaît pas suffisant, et pour arrêter le phénomène, des dispositifs d'aménagement des eaux (dérivation, drainage) ou d'étanchéification du fond du cratère (et des points d'entrée/sortie des eaux) seraient nécessaires.

Effondrement à Seillans (date inconnue)

Un effondrement s'est produit dans le quartier du Baguier à Seillans (précision décamétrique). La date n'est pas connue. Les dimensions sont importantes, de la taille d'un versant mais n'ont pas été précisées.



Photo du site de l'effondrement à Seillans © BRGM (2002)

Sources BDMVT : visite de terrain BRGM, rapport E des Garets 2002

Cet effondrement se situe d'après la carte géologique au 1/50 000 sur des éboulis du Keuper t3.

Effondrement à Seillans (décembre 2006)

Cet effondrement s'est produit en décembre 2006 et a engendré des dommages sur le réseau routier (RD53, PR8+50). Il s'agit d'un affaissement de la chaussée au droit d'un ouvrage hydraulique de traversée sous chaussée. L'eau s'écoulant de la canalisation s'infiltre dans le trou mais ne ressort pas à l'aval. Les causes de cet événement sont donc anthropiques (rupture de canalisation) et naturelles (pluie).



Photo du site de l'effondrement à Seillans de décembre 2006 © BRGM (2002).

Sources BDMVT : Conseil Général du Var

Cet effondrement se situe d'après la carte géologique au 1/50 000e sur du Keuper t3

Effondrement à Tourrettes (XVIIe siècle)

Cet effondrement s'est produit au 17^e siècle, au niveau de l'étang de Chautard (précision kilométrique) et a créé une dépression de 30 m de diamètre, actuellement occupée par un étang.

Sources BDMVT : témoignage de la mairie et visite de terrain BRGM 2002

Cet effondrement se situe d'après la carte géologique au 1/50 000e sur du Keuper t3



Photo du site de l'effondrement à Tourrettes © BRGM (2002).

Effondrement à Tourrettes (décembre 1987)

Un effondrement s'est produit près de la rivière du Chautard à Tourrettes en décembre 1987 (précision : communale). Le diamètre de la dépression est de 20 m et sa profondeur 50 m. Des dommages ont été causés aux biens (bâti individuel) mais aucune victime n'est à déplorer. Une vingtaine de personnes a été évacuée.

Sources BDMVT : LCPC, DRM et DDE 83

Cet effondrement se situe d'après la carte géologique au 1/50 000e sur du Keuper t3

Effondrement à Tourrettes (1951)

Un effondrement partiel du toit d'une galerie karstique (calcaire plus ou moins dolomitisé) a eu lieu en 1951, à l'aven du Jas Neuf (précision kilométrique). Des mouvements induits ont été observés avec la formation de 3 avens.

Sources BDMVT : Carte de BRGM 88SGN765PAC-G. Gonzalez-PER de Tourettes - Rapport technique - Analyse des risques géologiques + visite de terrain BRGM 2002

Cet effondrement se situe d'après la carte géologique au 1/50 000e sur du Jurassique dolomitique jD

Effondrement à Callian (mai 1935)

Un effondrement a eu lieu en mai 1935 dans la Grande Rue du Vieux Village (précision : décamétrique). D'après Durozoy et Gouvernet (1966)⁴⁶, les premiers désordres ayant affecté les maisons bâties sur le bord oriental du promontoire rocheux sur lequel est édifié Callian, datent de 1935 ; ils ont entraîné l'évacuation de quelques immeubles situés à l'amont.

Sources BDMVT : témoignage mairie + visite terrain 2002 + Service Carte Géologique–J.Repelin
Collaborateur principal au service de la carte géologique de la France–Rapport géologique sur les effondrements de terrain affectant tout le quartier du village de Callian

Cet effondrement se situe d'après la carte géologique au 1/50 000e sur du Keuper t3

Effondrement à Callian (24 mai 1952)

Un autre effondrement a eu lieu le 24 mai 1952 dans la Grande Rue du Vieux Village (précision : décamétrique).

D'après Durozoy et Gouvernet (1966), l'effondrement proprement dit, ayant provoqué la formation d'un véritable cratère ne s'est produit qu'en 1952. A la suite de celui-ci, la décision a été prise de raser les immeubles précédemment évacués.

Sources BDMVT : témoignage mairie + visite terrain 2002 + Scté MENARD--Etude Géophysique autour de l'éboulement de Callian (1960) + Faculté Marseille–M. Corroy Professeur à la faculté des sciences de Marseille–Commune de Callian : Etude géologique de l'éboulement des 24-25 mai 1952

Cet effondrement se situe d'après la carte géologique au 1/50 000e sur du Keuper t3

Effondrement à Callians (août 1965)

Cet effondrement a eu lieu en août 1965, dans la Grande Rue du Vieux Village (précision : communale). Dépression de 35 m de diamètre et 25 m de profondeur. La cavité a été comblée en 1966.

D'après Durozoy et Gouvernet (1966), un nouvel effondrement, agrandissant encore les dimensions de l'entonnoir, s'est produit en juillet 1965. L'effondrement se situe sous les dernières maisons du village. Le fond de l'aven est rempli d'eau, mais ce n'est qu'au bout d'un certain nombre d'heures après l'éboulement de juillet, et après une chute brutale d'un volume important de matériaux venant des parois, que l'eau est apparue.

Un autre petit effondrement est connu à une cinquantaine de mètres, au sud-sud-ouest, près du lavoir, il a toujours existé, mais les affaissements sont de faible ampleur.

46



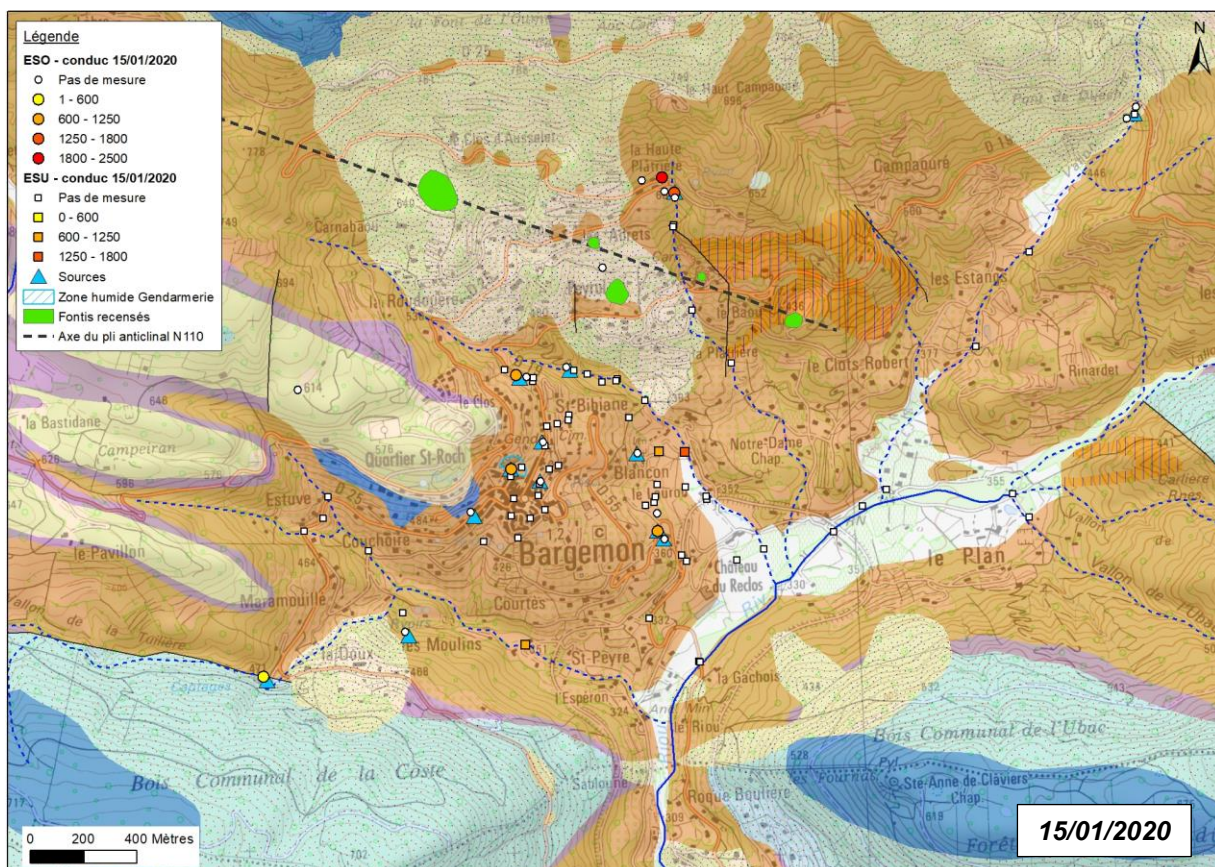
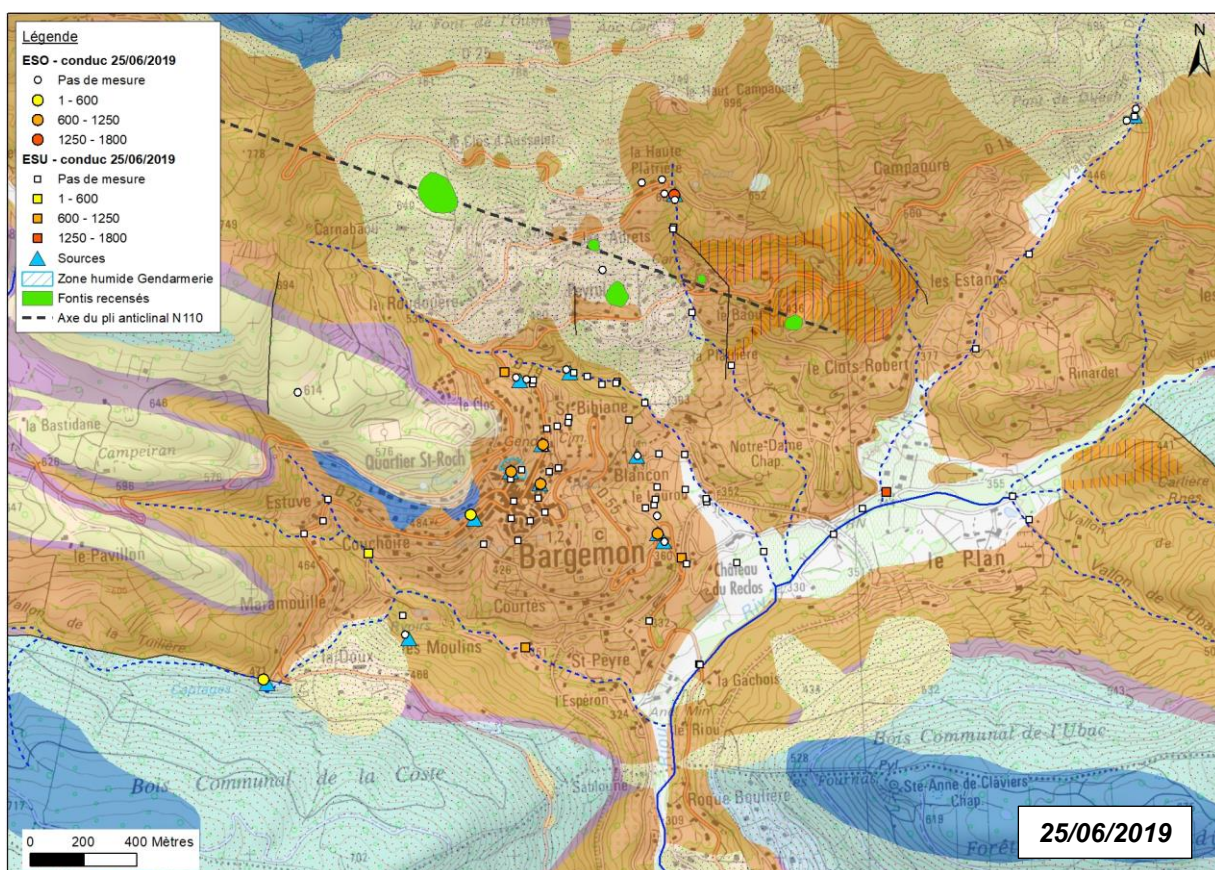
À gauche : Vue de l'effondrement à Callians (Durozoy et Gouvernet, 1966) ; À droite : Photo du site de l'effondrement à Callians © BRGM (2002)

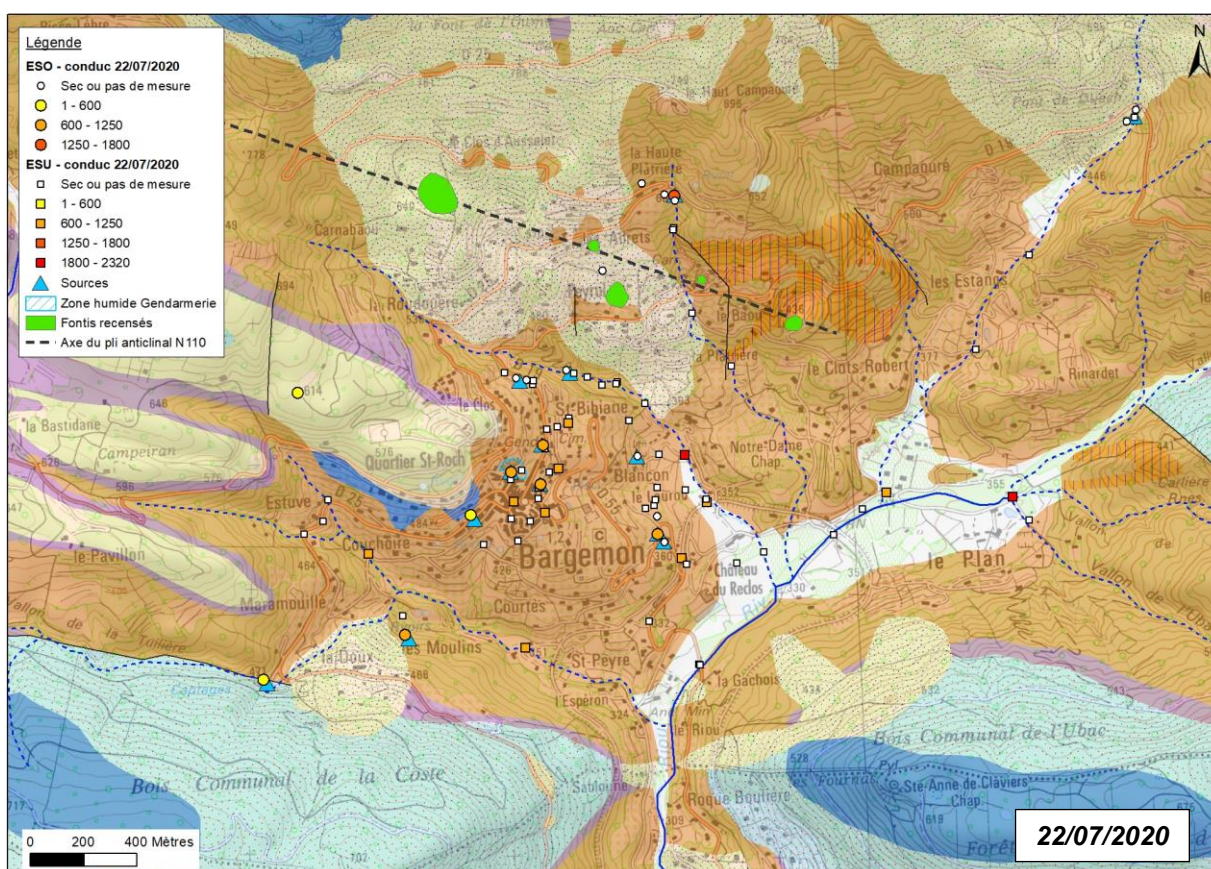
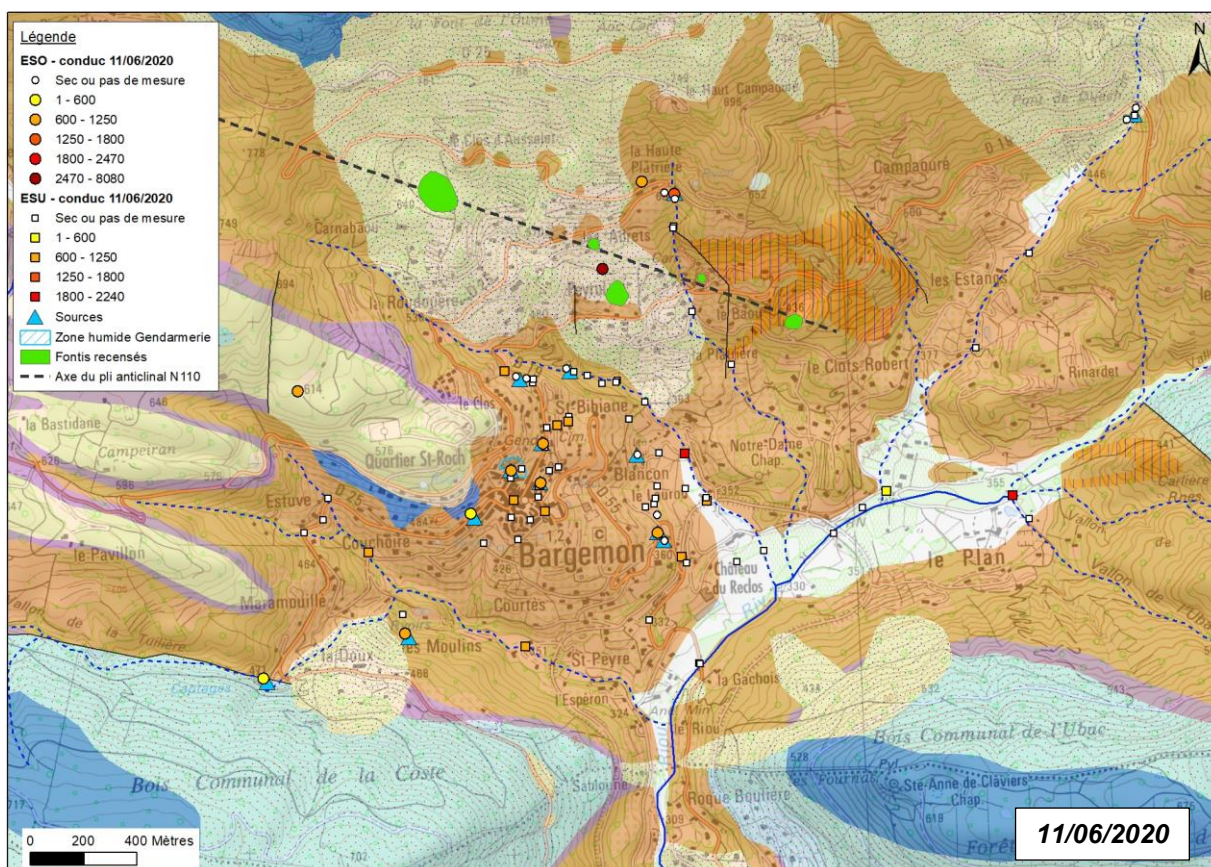
Sources BDMVT : témoignage mairie + visite terrain 2002 + DSGR66A2-G. DUROZOY CL GOUVERNET-BRGM 1966.

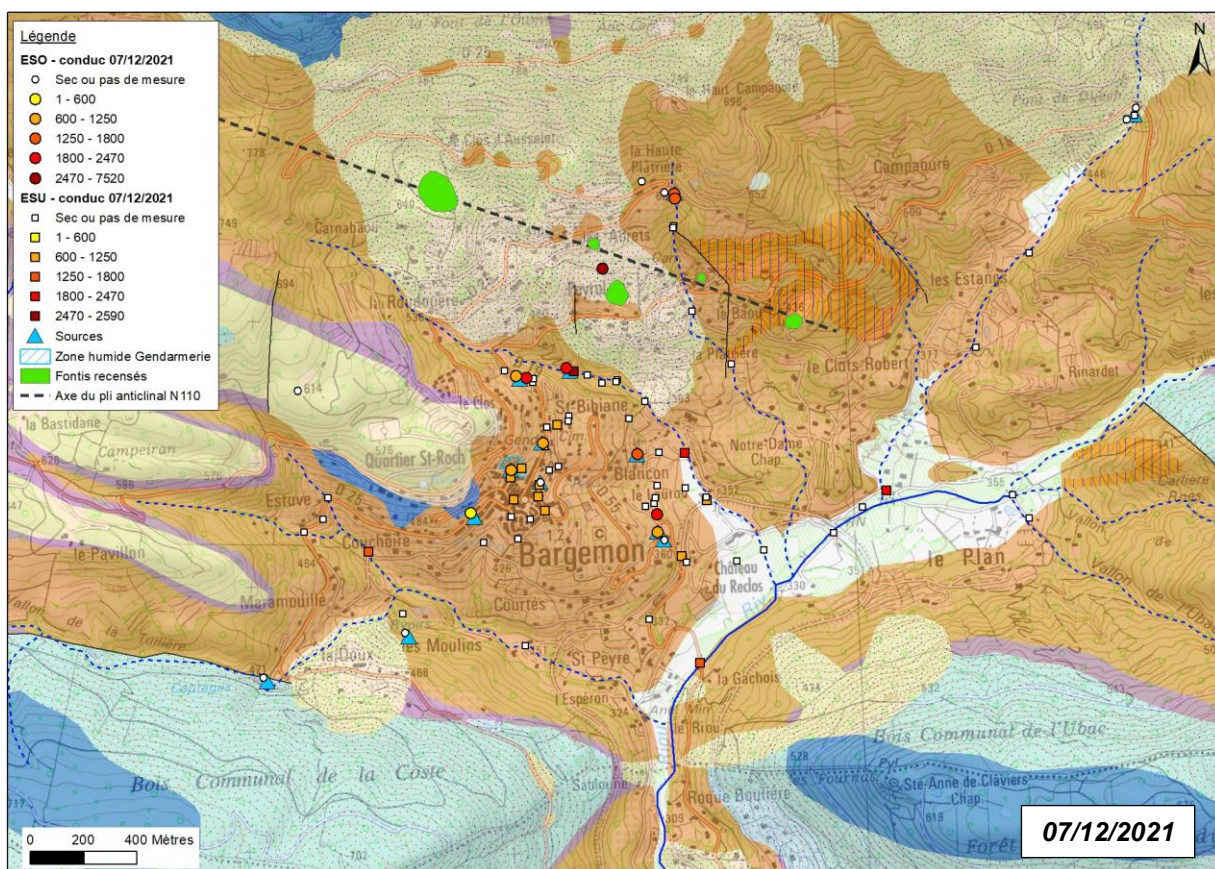
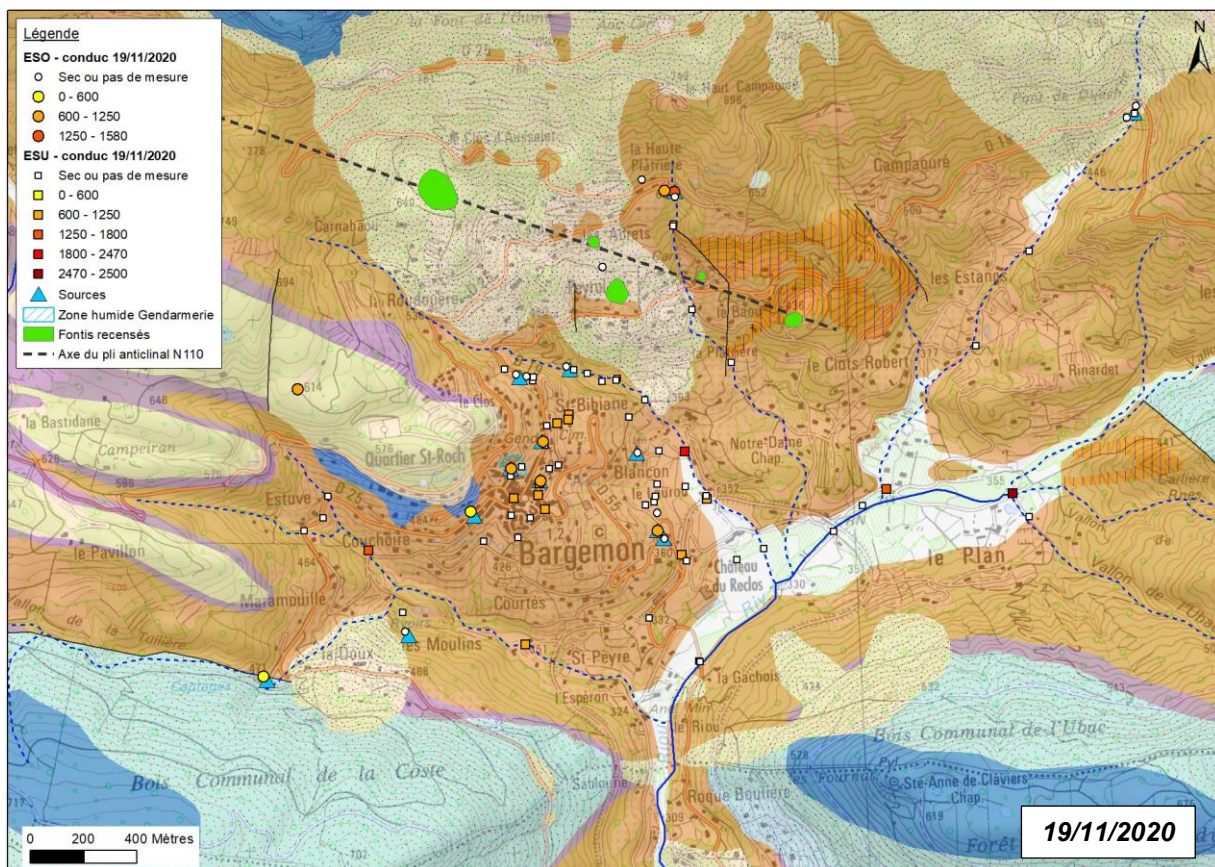
Cet effondrement se situe d'après la carte géologique au 1/50 000e sur du Jurassique moyen dolomitique jD.

Annexe 2

Campagnes de mesure de la conductivité électrique des eaux





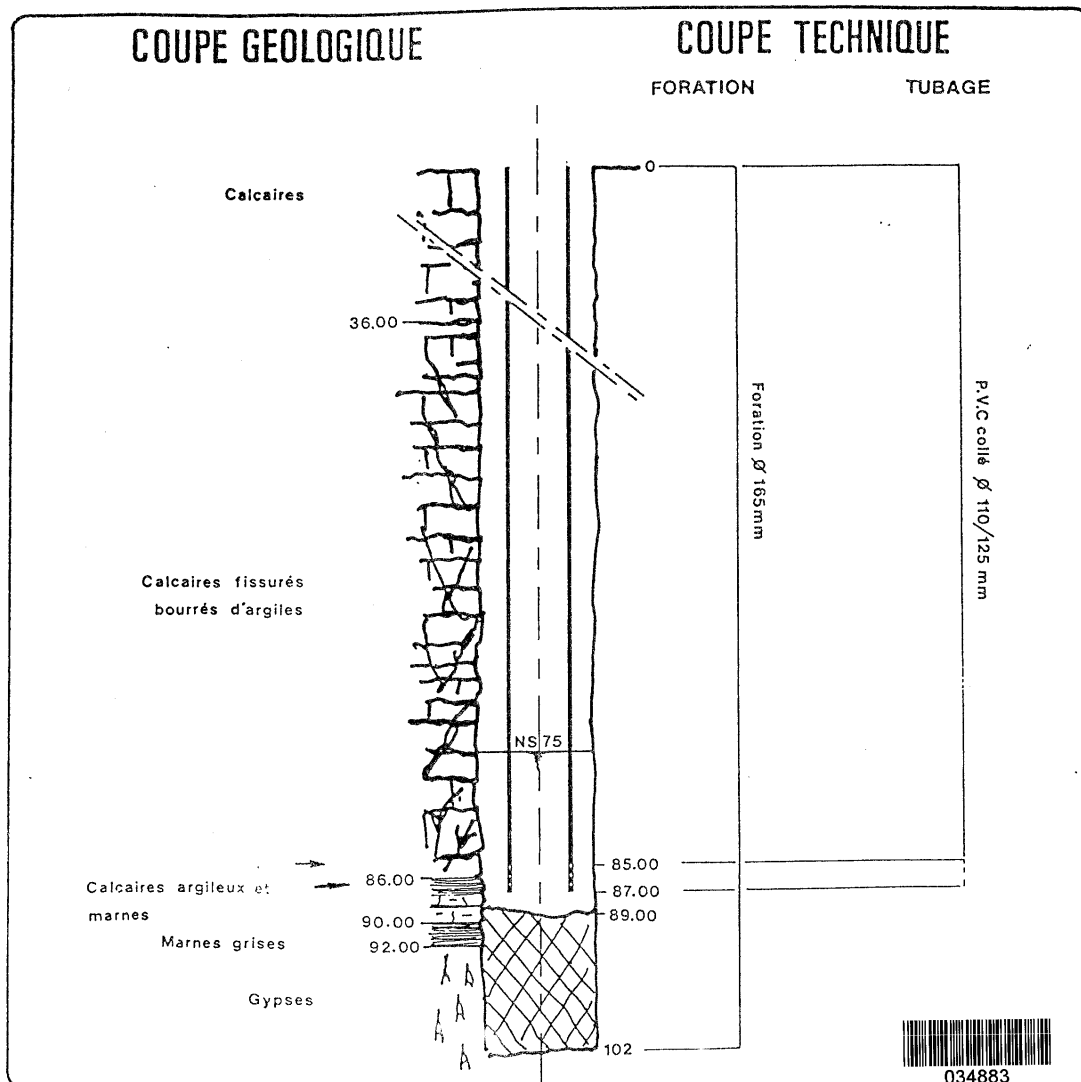


Annexe 3

Coupe géologique et technique du forage AEP du Stade

Conseil Général
CELLULE GEOLOGIQUE
départementale

Commune de BARGEMON
Quartier St ROCH
Forage N°3 09985X006 8/F/RC



Maitre d'Ouvrage : Commune de BARGEMON

Maitre d'Ouvre : service géologique

Entreprise : W ROGER

Date de Réalisation : AOUT 1990

Code BSS :

X = 939.240

Y = 155.720

Z = 620

CARACTERISTIQUES HYDRAULIQUES

Essai de Pompage du : AOUT 1990

Débit Spécifique : 6.7 m³/h/m

Débit Maximum : 3.5 m³/h

Débit d'Équipement :

Annexe 4

TRE – Méthode, traitements, modélisation et résultats bruts

1. MÉTHODE

1.1. Principe théorique

La tomographie électrique (ERT pour Electrical Resistivity Tomography) est une méthode géophysique permettant d'obtenir la distribution de la résistivité électrique des matériaux (roches ou structures) en profondeur (2D et 3D selon le dispositif d'acquisition mis en place) à partir de mesures de potentiel électrique réalisées en surface.

Le principe de base de la prospection électrique est d'injecter dans le sol un courant électrique d'intensité I entre deux électrodes A et B et de mesurer la différence de potentiel ΔV induite entre une autre paire d'électrodes M et N (Illustration à droite).

À partir de la valeur du courant injecté I , de la mesure de la différence de potentiel ΔV et de l'écartement entre les différentes électrodes, on peut déterminer la **résistivité électrique apparente** du sous-sol sur base de la loi d'Ohm :

$$\rho_{app} = K \times \frac{\Delta V}{I}$$

où K est un facteur dépendant de la géométrie du dispositif de mesure (Illustration AX.1) :

$$k = 2\pi \left(\frac{1}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN}} \right)$$

La résistivité apparente d'un terrain hétérogène correspond à la résistivité d'un terrain homogène qui, pour une configuration identique des électrodes et un même courant injecté, donnerait la même mesure ΔV . Elle est fonction de la résistivité, de la géométrie des diverses couches et de la disposition des électrodes. Il existe plusieurs dispositifs d'électrodes utilisés en pratique : Schlumberger, Wenner, dipôle-dipôle, pôle-pôle, etc.

1.2. DISPOSITIFS ET PROTOCOLES

Un dispositif correspond à l'ensemble des matériels mis en œuvre sur le terrain (électrodes, centrales d'acquisitions...).

Dans le cadre de cette étude, des dispositifs de 96 électrodes seront déployés, avec une distance inter-trace de 5 m ou 10 m, pour un linéaire total de 475 m ou 950 m par dispositif.

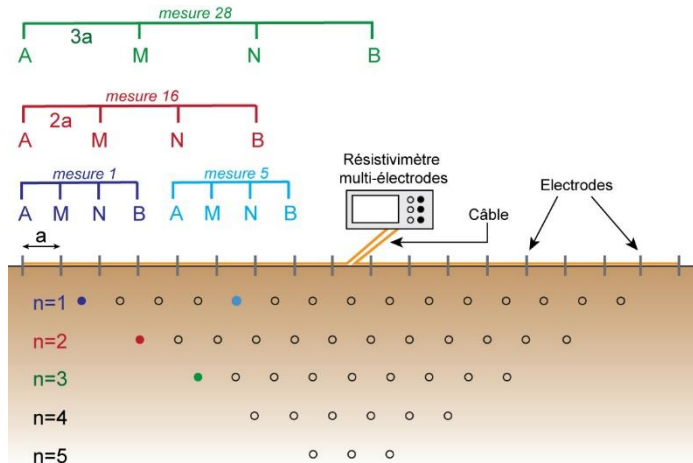
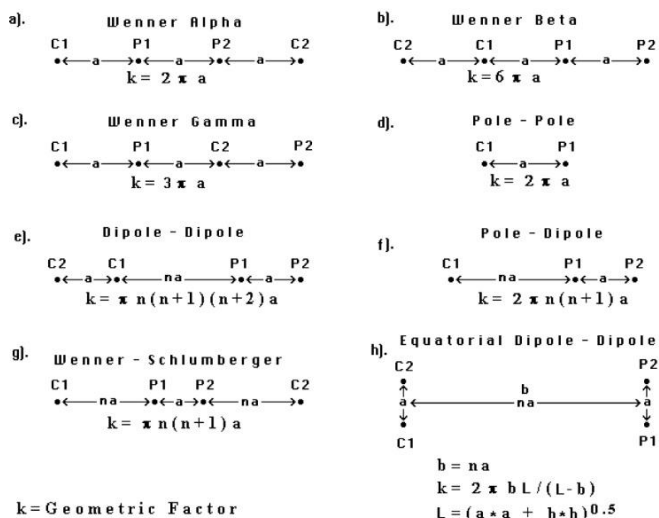


Schéma du principe de mesure en TRE 2D.

Un protocole est un agencement géométrique des électrodes d'injection (C1-C2) et des électrodes de mesure de potentiel (P1-P2). En TRE 2D, de nombreux protocoles existent (Illustration à droite), dont les spécificités et détails techniques sont décrits par Loke (2000).

Les différences majeures entre ces configurations sont la distribution des lignes de courant électrique dans le sol et donc la forme des équipotentielles en surface ainsi que la valeur du coefficient géométrique K qui conditionnera les valeurs du courant minimal I à injecter pour mesurer un potentiel électrique minimal U fiable. Selon les équipements utilisés, certains dispositifs sont également plus rapides (dipôle-dipôle) à acquérir que d'autres (Schlumberger) grâce à des acquisitions multivoies

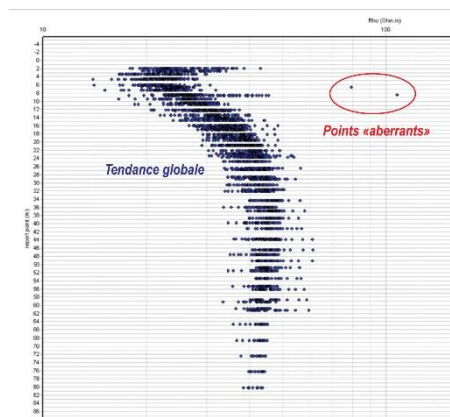
(plusieurs mesures de δv pour une injection de courant.



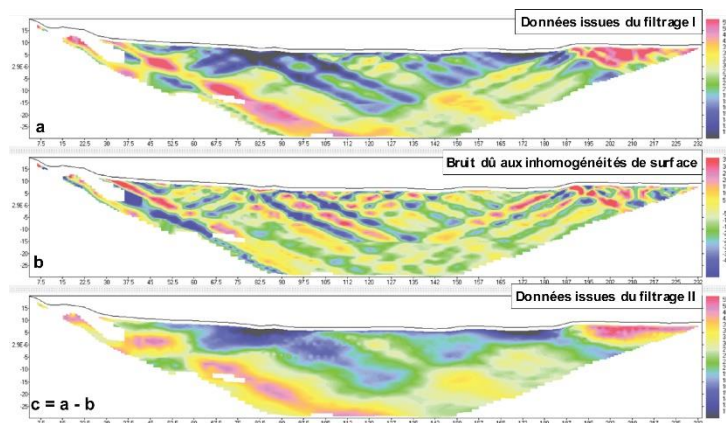
Exemples de protocole de mesure couramment utilisés en TRE (d'après Loke, 2000). Le protocole Wenner-Schlumberger réciproque consiste à inverser les électrodes émettrices (C1-C2) et réceptrices (P1-P2) du protocole Wenner Schlumberger (g).

1.3. TRAITEMENT ET INVERSION DES DONNÉES

Les données brutes traitées à l'aide du logiciel PROSYS II (V03.13.06 Iris Instrument ; Illustration ci-dessous à gauche) et/ou du logiciel X2IPI (Robain et Bobachev, 2017; Illustration ci-dessous à droite), en suivant les recommandations de l'AGAP (AGAP, 1992).

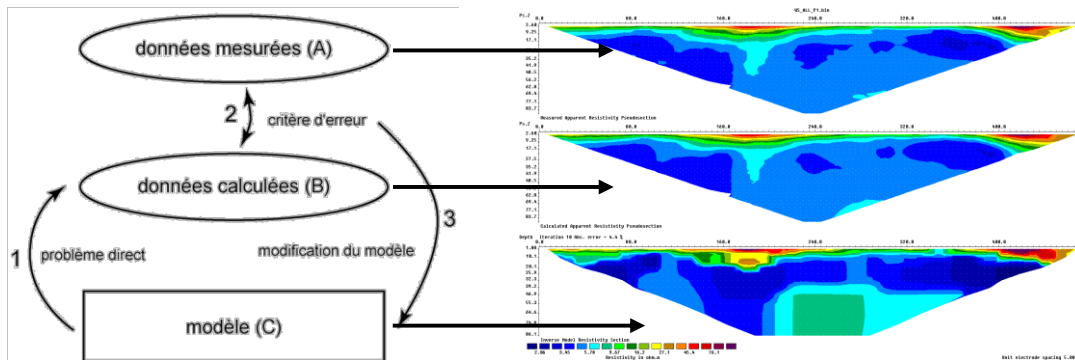


Filtrage PROSYS (filtrage I) - Représentation des valeurs de résistivité en fonction de la profondeur vue à travers l'interface de suppression des points aberrants.



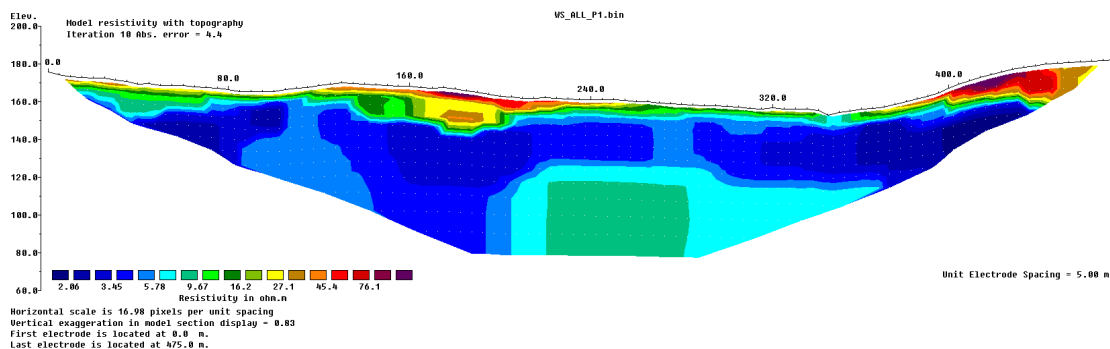
Filtrage X2IPI (filtrage II) – Représentation du traitement avancé des données de résistivité électriques réalisé avec le logiciel X2IPI. En haut, les données issues du premier filtrage, au milieu le bruit dû aux inhomogénéités superficielles et en bas, les données filtrées de ce bruit.

Afin d'obtenir une image quantitative représentant les variations de résistivité réelle en fonction de la profondeur, il est nécessaire d'inverser les données mesurées. Cette étape est réalisée à l'aide du logiciel Res2DInv (Geotomo Software, 2019). Cette inversion des données est réalisée suivant un processus itératif qui tente de minimiser l'écart entre la pseudo-section de résistivités apparentes mesurées et une pseudo-section recalculée à partir d'un modèle de résistivité électrique (Illustration ci-après page suivante). Ce modèle est modifié à chaque itération jusqu'à ce que les données mesurées et calculées atteignent une concordance acceptable ou jusqu'à ce qu'aucune nouvelle amélioration ne soit possible.



A gauche : schéma de principe de l'inversion des données électriques (Marescot, 2008). A droite : représentation des pseudo-sections de résistivités lors du processus d'inversion.

Afin de prendre en compte les morphologies rencontrées, la topographie de chaque profil est incluse lors de l'inversion (Illustration ci-dessous).



Coupe 2D de distribution des résistivités électriques inversée avec la topographie.

La section de résistivité « vraie » (Illustration ci-dessus), résultat de l'inversion, sera ensuite utilisée pour l'interprétation. Elle fournit des informations quantitatives permettant de caractériser l'origine des différentes anomalies mises en évidence : résistivité, géométrie des horizons, profondeur, pendage. Les résultats de l'inversion sont présentés sous forme d'une coupe semblable à celle de résistivité apparente présentant la distribution des résistivités calculées le long du profil en fonction de la profondeur.

Pour chaque cas, des paramètres d'inversion sont choisis de manière à optimiser la réponse du modèle en incluant une information *a priori*.

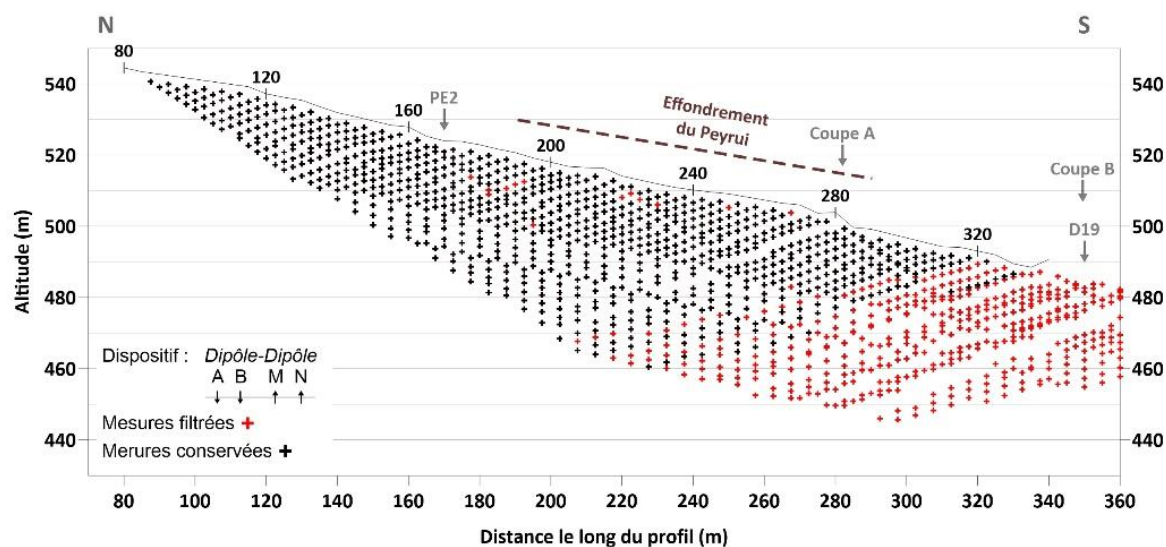
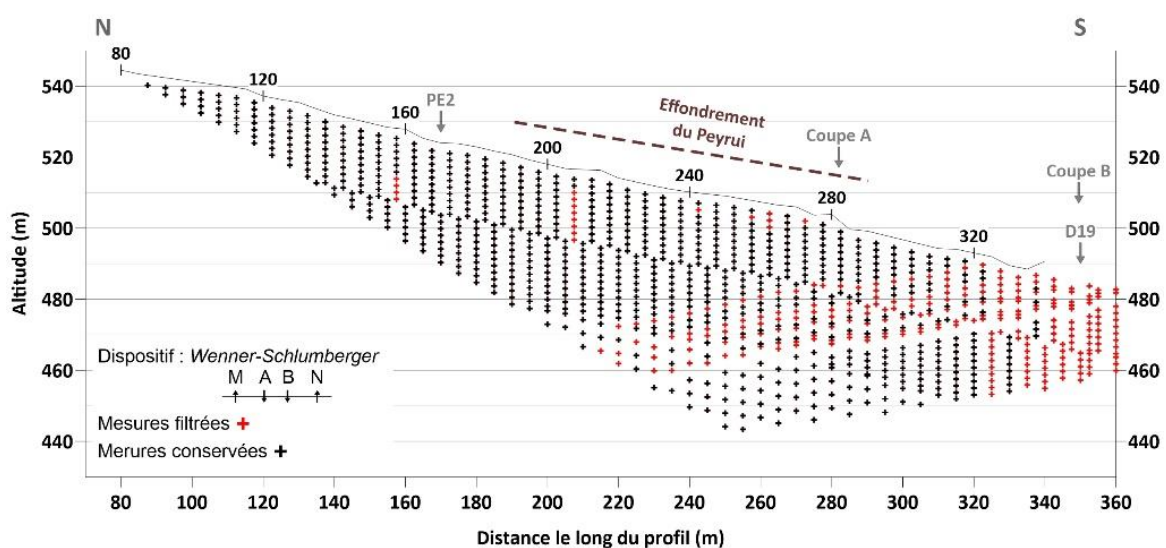
Quelles que soient les performances des algorithmes de convergence, en l'absence d'étalonnage (résistivité étalonnée, profondeur des interfaces géo électriques) les paramètres fournis par l'inversion ne sont pas définis de manière univoque (il y a plusieurs solutions satisfaisant au même jeu de données) et sont soumis à des principes d'équivalence. Cette indétermination ne

peut être évaluée qu'en testant différentes solutions ou en contraignant l'inversion au moyen de paramètres (résistivités, épaisseurs, profondeurs) obtenus par d'autres moyens (autre méthode géophysique, diagraphies, forages, observations de terrain).

2. FILTRAGE DES DONNÉES ÉLECTRIQUES DU PE3

Les Illustrations page suivante, représentent la répartition des points de mesures supprimées (rouge) et conservées (noir) après filtrage des données brutes du profil PE3. L'impossibilité d'implanter l'ensemble des électrodes au-delà de l'abscisse 320 m le long de ce profil, combinée à une forte hétérogénéité des terrains superficielles due à l'anthropisation importante de ce secteur, ont conduit à la suppression de nombreux points de mesure dans cette zone, ces derniers étant affectés d'un rapport signal/bruit très faible.

Le Peyrui - PE3



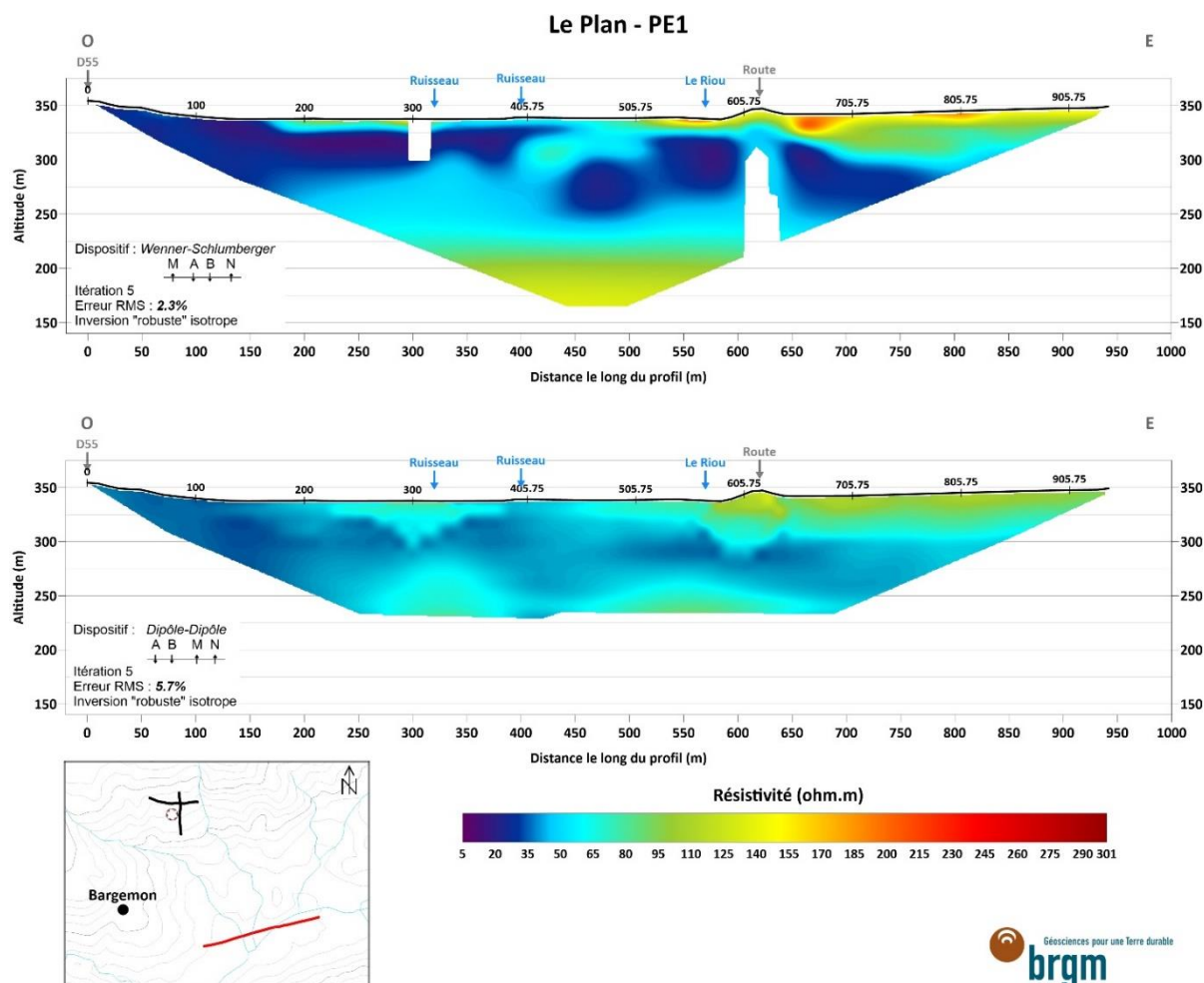
PE1 - Pseudo-section des points de mesures filtrés (rouge) et conservés (noir) après filtrage.

3. PARAMÈTRES D'INVERSION DES DONNÉES

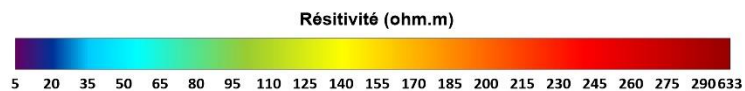
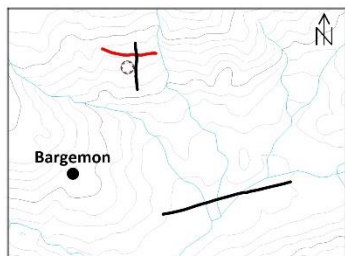
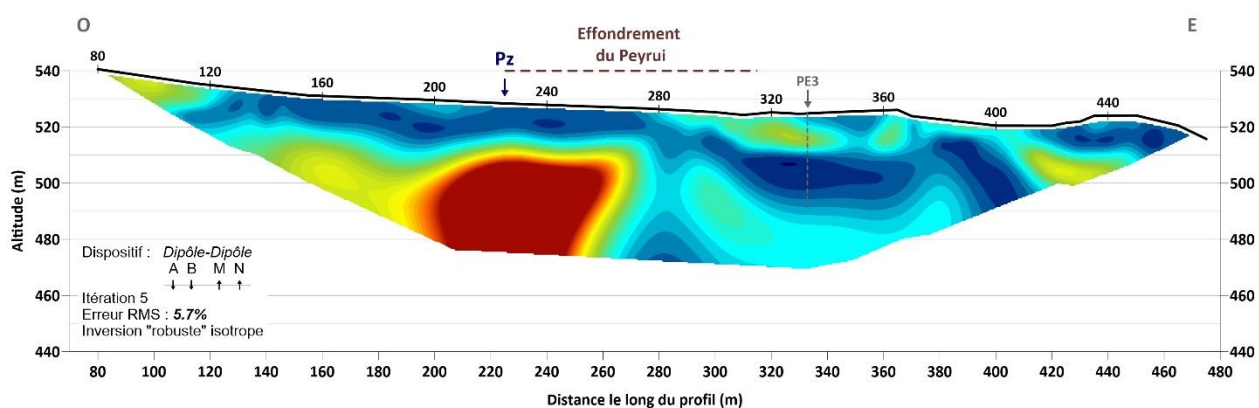
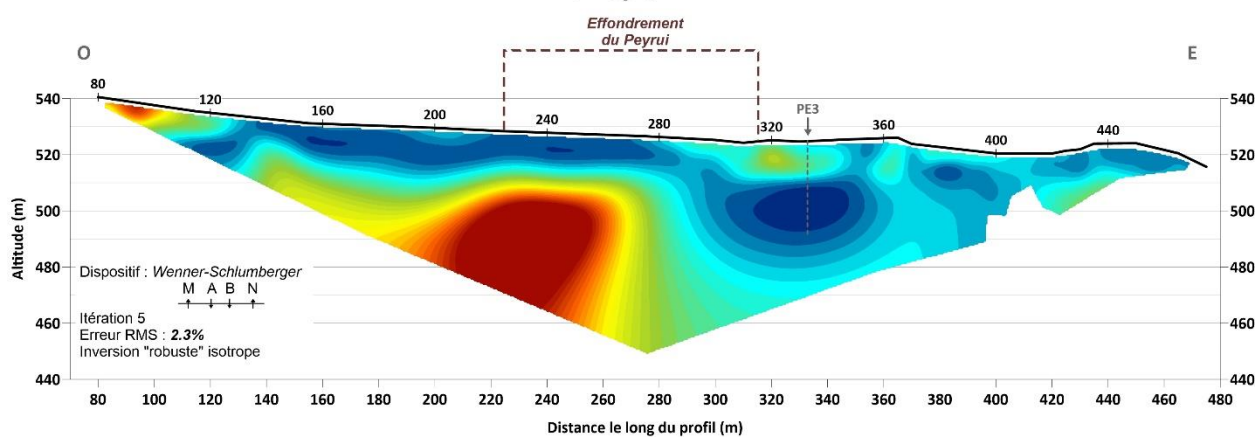
Initial damping factor (0.01 to 1.00)	0.1500	Reduce effect of side blocks? (0=No, 1=Slight, 2=Severe, 3=Very Severe)	2	1.00
Minimum damping factor (0.001 to 0.75)	0.0200	Type of mesh	0	Combined Combined Marquardt and Occam inversion (0=Not used,1=used)
Local optimization option (0=No, 1=Yes)	1	(0=Normal,1=Fine,2=Finest)	0	Type of optimisation method (0=Gauss-Newton,2=Incomplete GN)
Convergence limit for relative change in RMS error in percent (0.1 to 20)	5.0000	Optimise damping factor? (0=No, 1=Yes)	1	0
Minimum change in RMS error for line search in percent (0.5 to 100)	0.5000	Time-lapse inversion constrain (0=None,1&2=Smooth,3=Robust)	3	Convergence limit for Incomplete Gauss-Newton method (0.005 to 0.05)
Number of iterations (1 to 30)	5	Type of time-lapse inversion method (0=Simultaneous,1=Sequential)	0	0.005
Vertical to horizontal flatness filter ratio (0.25 to 4.0)	1.0000	Thickness of first layer (0.25 to 1.0)	0.5190	Use data compression with Incomplete Gauss-Newton (0=No,1=Yes)
Model for increase in thickness of layers(0=default 10%, 1=default 25%, 2=user defined)	2	Factor to increase thickness layer with depth (1.0 to 1.25)	1.1000	0
Number of nodes between adjacent electrodes (1, 2 or 4)	4	USE FINITE ELEMENT METHOD (YES=1,NO=0)	1	Use reference model in inversion (0=No,1=Yes)
Flatness filter type, Include smoothing of model resistivity (0=model changes only,1=directly on model)	1	WIDTH OF BLOCKS (1=NORMAL WIDTH, 2=DOUBLE, 3=TRIPLE, 4=QUADRAPLE, 5=QUINTIPLE)	1	1
Reduce number of topographical data points? (0=No,1=Yes. Recommend leave at 0)	0	MAKE SURE BLOCKS HAVE THE SAME WIDTH (YES=1,NO=0)	1	Damping factor for reference model (0.0 to 1.0)
Carry out topography modeling? (0=No,1=Yes)	1	RMS CONVERGENCE LIMIT (IN PERCENT)	0.100	0.01000
Type of topography trend removal (0=Average,1=Least-squares,2=End to end)	2	USE LOGARITHM OF APPARENT RESISTIVITY (0=USE LOG OF APPARENT RESISTIVITY, 1=USE RESISTANCE VALUES, 2=USE APPARENT RESISTIVITY)	0	Use fast method to calculate Jacobian matrix. (0=No,1=Yes)
Type of Jacobian matrix calculation (0=Quasi-Newton, 1=Gauss-Newton, 2=Mixed)	1	TYPE OF IP INVERSION METHOD (0=CONCURRENT,1=SEQUENTIAL)	0	1
Increase of damping factor with depth (1.0 to 2.0)	1.0500	PROCEED AUTOMATICALLY FOR SEQUENTIAL METHOD (1=YES,0=NO)	0	Use higher damping for first layer? (0=No,1=Yes)
Type of topographical modeling (0=None, 1=No longer supported so do not use, 2=uniform distorted FEM, 3=underwater, 4=damped FEM, 5=FEM with inverse Swartz-Christoffel)	4	IP DAMPING FACTOR (0.01 to 1.0)	0.250	0
Robust data constrain? (0=No, 1=Yes)	1	USE AUTOMATIC IP DAMPING FACTOR (YES=1,NO=0)	0	Extra damping factor for first layer (1.0 to 100.0)
Cutoff factor for data constrain (0.0001 to 0.1))	0.0500	CUTOFF FACTOR FOR BOREHOLE DATA (0.0005 to 0.02)	0.00010	10.00000
Robust model constrain? (0=No, 1=Yes)	1	TYPE OF CROSS-BOREHOLE MODEL (0=normal,1=halfsize)	0	Type of finite-element method (0=Triangular,1=Trapezoidal elements)
Cutoff factor for model constrain (0.0001 to 1.0)	0.0050	LIMIT RESISTIVITY VALUES(0=No,1=Yes)	0	1
Allow number of model parameters to exceed data points? (0=No, 1=Yes)	1	Upper limit factor (10-50)	50.000	Factor to increase model depth range (1.0 to 5.0)
Use extended model? (0=No, 1=Yes)	1	Lower limit factor (0.02 to 0.1)	0.020	1.050
		Type of reference resistivity (0=average,1=first iteration)	0	Reduce model variations near borehole (0=No, 1=Yes)
		Model refinement (1.0=Normal,0.5=Half-width cells)	0	0
				Factor to control the degree variations near the boreholes are reduced (2 to 100)
				5.0
				Factor to control variation of borehole damping factor with distance (0.5 to 5.0)
				1.0
				Floating electrodes survey inversion method (0=use fixed water layer, 1=Incorporate water layer into the model)
				1
				Resistivity variation within water layer (0=allow resistivity to vary freely,1=minimise variation)
				1
				Use sparse inversion method for very long survey lines (0=No, 1=Yes)
				0
				Optimize Jacobian matrix calculation (0=No, 1=Yes)
				0
				Automatically switch electrodes for negative geometric factor (0=No, 1=Yes)
				1
				Force resistance value to be constant with the geometric factor (0=No, 1=Yes)
				0
				Shift the electrodes to round up positions of electrodes (0=No, 1=Yes)
				0

Use difference of measurements in time-lapse inversion (0=No,1=Yes)	1	0
0	Joint or separate I.P. inversion method (1=Separate, 0=Joint)	Use higher damping factors at sides of model? (0=No,1=Yes)
Use active constraint balancing (0=No,1=Yes)	1	1
0	Apparent I.P. cutoff value (300 to 899 mV/V)	Adjust damping factors for distances between the blocks in the model? (0=No,1=Yes)
Type of active constraints (0=Normal,1=Reverse)	899.00	1
0	Use diagonal filter (0=No, 1=Yes)	Number of electrodes in segment for sparse inversion method for very long survey lines.
Lower damping factor limit for active constraints	Diagonal filter weight (0.2 to 5.0)	250
0.4000	1.00	Time-lapse damping factor.
Upper damping factor limit for active constraints	Limit range of data weights from error estimates? (0=No, 1=Yes)	0.25
2.5000	0	Reduce time-lapse damping with each iteration? (0=No,1=Yes)
Water resistivity variation damping factor	Lower limit of data weights (0.2 to 0.5)	1
8.0000	0.30	Filter input data using gemetric factor? (0=No,1=Yes)
Use automatic calculation for change of damping factor with depth (0=No,1=Yes)	Upper limit of data weights (2.0 to 5.0)	0
0	3.00	Automatically remove negative apparent resistivity values? (0=No,1=Yes)
Type of I.P. model transformation (0=None, 1=square root, 3=range)	Use same data weights from error estimates for different time series? (0=No, 1=Yes)	0
3	0	Automatically remove Gamma type arrays? (0=No,1=Yes)
Model Chargeability Lower Limit (mV/V) for range	Calculate model resolution? (0=No, 1=Yes)	0
0.00	0	Topography distortion damping factor (0.1 to 2.0)
Model Chargeability Upper Limit (mV/V) for range	Use L curve method? (0=No, 1=Yes)	0.750
900.00	0	Use zero reference I.P. model value? (0=No, 1=Yes)
Use I.P. model refinement (0=No, 1=Yes)	Use same norms in L curve method? (0=No, 1=Yes)	0
1	0	Use apparent IP data in resistivity inversion. (0=No, 1=Yes)
Weight for I.P. data (0.1 to 10)	Allow damping factor in increase in L curve method? (0=No, 1=Yes)	1
1.0000	1	Delete temporary files during inversion? (0=No, 1=Yes)
I.P. model damping factor (0.05 to 1.0)	Type of borehole damping method (0=Horizontal distance from nearest borehole, 1=Distance from nearest active electrode)	1
0.2500	0	
Use program estimate for I.P. model damping factor (0=No, 1=Yes)	0	
0	Use fast Jacobian calculation for dense data sets? (0=No,1=Yes)	
Type of I.P. smoothness constraint (1=Same as resistivity, 0=Different)		

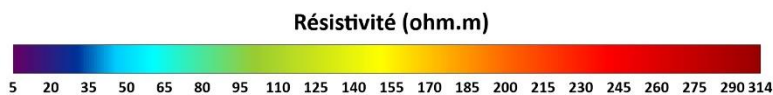
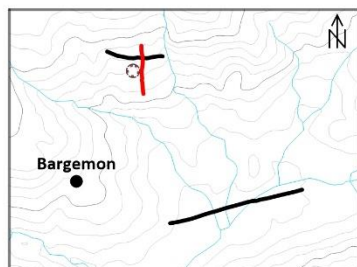
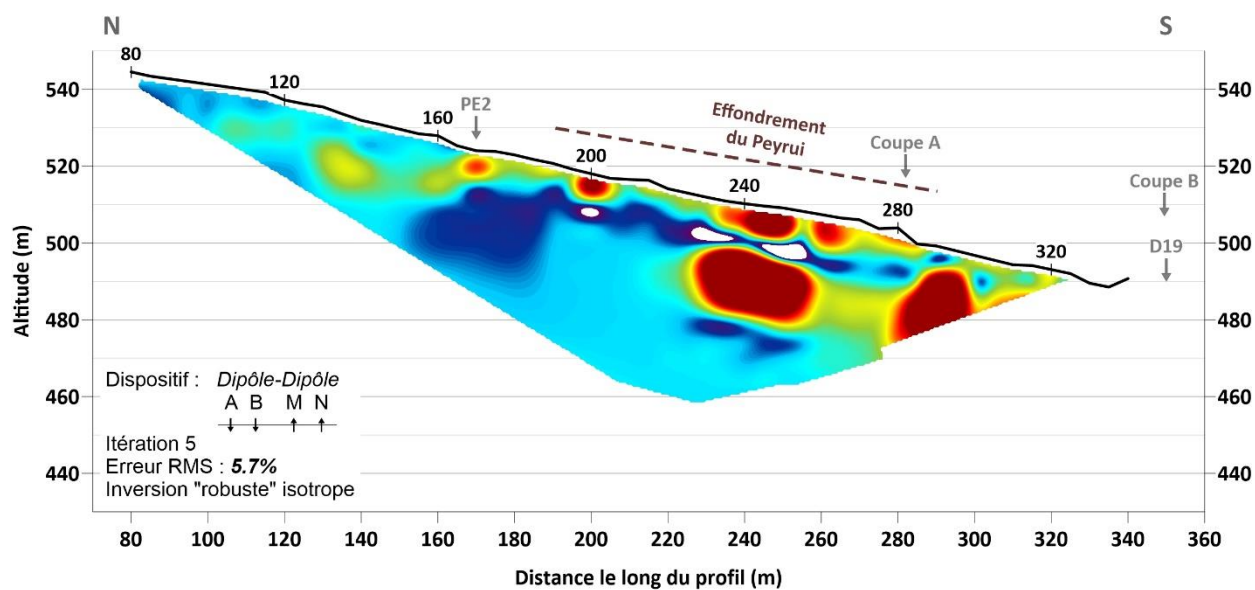
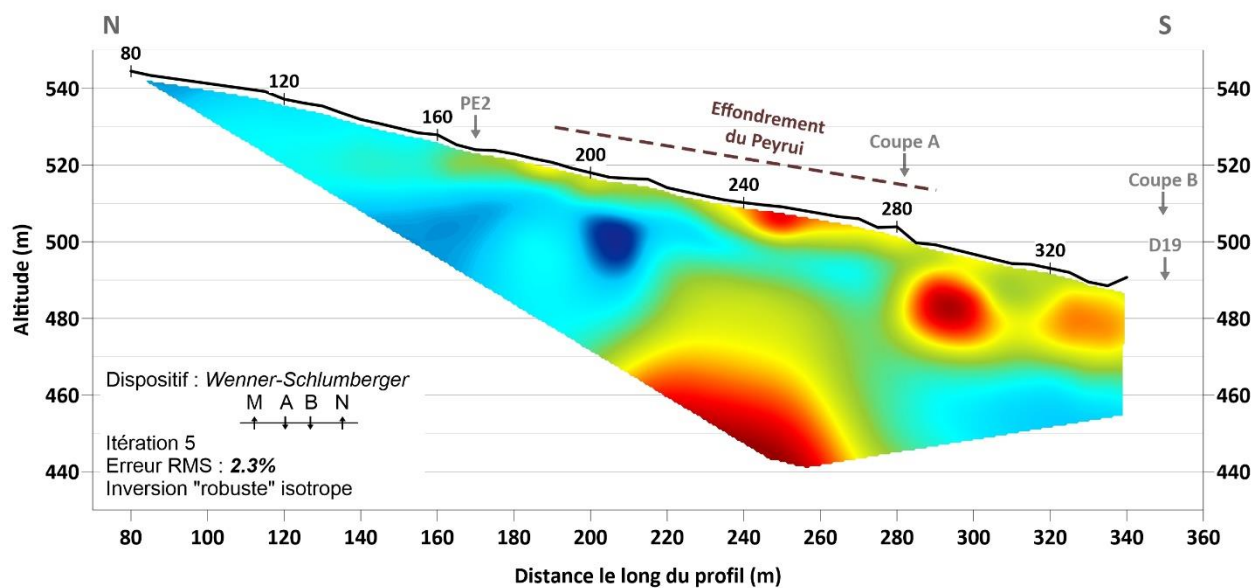
4. COUPES DES RÉSISTIVITÉS ÉLECTRIQUES BRUTES (NON-INTERPRÉTÉES)



Le Peyrui - PE2



Le Peyrui - PE3



Annexe 5

Imagerie sismique

1. PRINCIPE GÉNÉRAL

L'imagerie sismique au sens large est l'étude de la propagation des ondes sismiques (équivalent à des ondes acoustiques) dans le sous-sol. Cette technique consiste à enregistrer, en surface, des échos issus de la propagation dans le sous-sol d'une onde sismique provoquée (sismique active). Ces échos sont générés par les hétérogénéités du sous-sol. Le passage entre deux couches aux propriétés physiques différentes va se traduire par la présence d'un réflecteur sur les enregistrements. Selon le mode de propagation de l'onde on parle de sismique réflexion (ondes réfléchies), de sismique réfraction (ondes transmises le long des interfaces) ou encore de sismique en ondes de surface (Illustration ci-dessous).

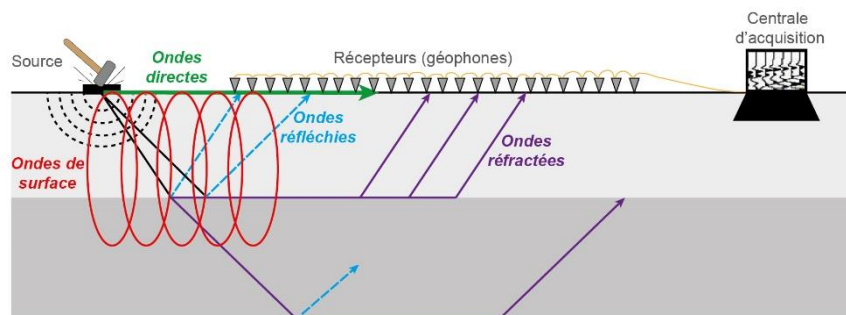


Schéma du principe de l'imagerie sismique.

Quel que soit le type d'onde support utilisé, l'imagerie sismique repose sur la mesure et l'analyse des paramètres suivants :

- le temps de parcours de l'écho entre le point d'émission et le capteur qui permet de positionner, dans l'espace, les interfaces ;
- l'amplitude de l'écho qui renseigne sur les paramètres physiques des milieux rencontrés.

L'imagerie sismique fournit une image de la structure du sous-sol, et dans certains cas des informations sur sa nature. Elle est donc employée dans de nombreux domaines : géologie et hydrogéologie, géotechnique pour l'implantation d'ouvrages ou la réalisation d'études d'impact...

2. DISPOSITIFS D'ACQUISITION

En imagerie sismique 2D, les acquisitions des profils sismique se traduit par le déploiement de 24 à 48 géophones de mesure (Illustration page suivante gauche), reliés à une centrale d'acquisition Stratavizor 48 traces par l'intermédiaire de câbles constitués de traces régulièrement espacées (5 m dans le cadre de cette étude). Pour des dispositifs de plus de 48 traces, des Géodes 24 traces (Geometrics, USA) sont utilisées pour relier les géophones supplémentaires à la centrale d'acquisition. Les ondes sismiques sont produites à l'aide d'une source de type chute de poids ou chute de poids accélérée A200P (Illustration page suivante à droite). Les géophones sont alignés avec un espacement régulier qui peut-être de 2, 5, 10 m.



À gauche : photos d'un récepteur sans fil utilisé pour l'imagerie sismique 3-D (haut) et d'un géophone relié au câble de mesure (bas, profil 2-d sismique réfraction). À droite : Photo de la source sismique de type chute de poids accélérée A200P.

Le BRGM dispose également d'un système d'acquisition mobile, essentiellement utilisé pour les acquisitions MASW (voir détail ci-après). Le matériel mobilisé est alors composé d'une ligne d'acquisition sur laquelle les capteurs sont fixes (Illustration à droite). L'ensemble de la ligne est tracté par un véhicule.

Les tirs sismiques sont réalisés à intervalles réguliers le long du dispositif. Pour les profils devant couvrir des distances supérieures à leur longueur unitaire, la technique du roll-along, qui consiste à déplacer une partie du matériel d'une extrémité à l'autre du profil, est utilisée. La longueur des roll-along dépend du matériel mis en œuvre et de la couverture longitudinale (le long du profil) souhaitée. Les mesures sont réalisées en couverture multiple afin d'optimiser le rapport signal-sur-bruit en déplaçant la source et la ligne de géophones le long d'un profil. Le déport entre la source et le premier géophone est appelé offset d'origine.



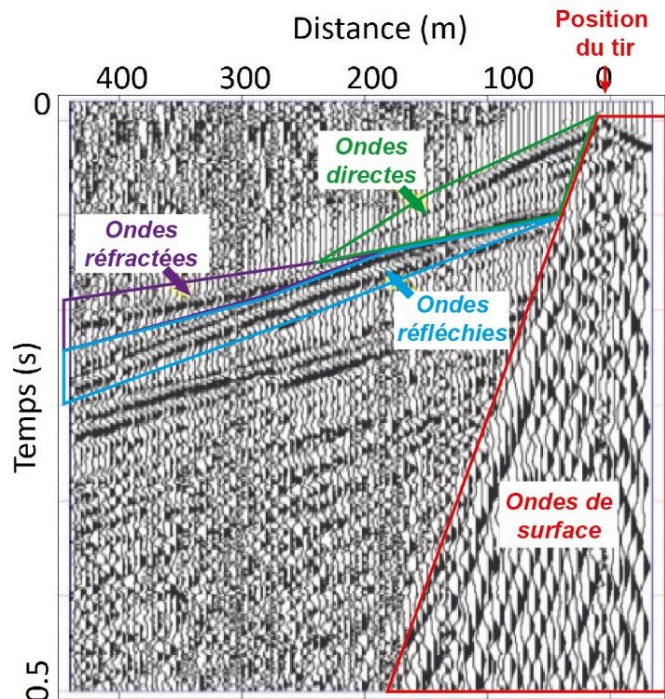
Photos du dispositif de mesure tractable du BRGM.

3. SISMIQUE RÉFLEXION HAUTE RÉOLUTION

La sismique réflexion se base sur l'étude des ondes réfléchies aux interfaces de milieux de contraste d'impédances (Illustration schéma page précédente) ; elle renseigne ainsi sur les changements de densité des terrains étudiés. Le temps d'arrivée de la réflexion permet de situer la position de ces interfaces dans l'espace ; l'amplitude de l'écho apporte des informations les contrastes d'impédances. La sismique réflexion est une technique d'imagerie superficielle (quelques mètres) à profondes (plusieurs kilomètres).

En sismique réflexion, l'enregistreur sismique fournit les temps de propagation et l'amplitude des échos sismiques entre le point d'impact (source) et les divers capteurs (géophones) du profil (Illustration schéma première page).

Connaissant la distance qui sépare le point d'impact des capteurs, on construit un diagramme temps-distance (hodochrone, Illustration ci-contre à droite), sur lequel les temps sont en ordonnée et les distances en abscisse. Cette méthode est une étape de base de l'interprétation graphique qui permet d'identifier les différents types d'ondes (ondes P, ondes S, ondes de surface) et les réflexions visibles sur les enregistrements (encadré jaune sur Illustration page précédente) pour mettre en place une séquence de traitement adéquate.



Exemple de diagramme d'acquisition sismique représentant le temps de parcours et l'amplitude des ondes sismiques le long d'une ligne d'acquisition.

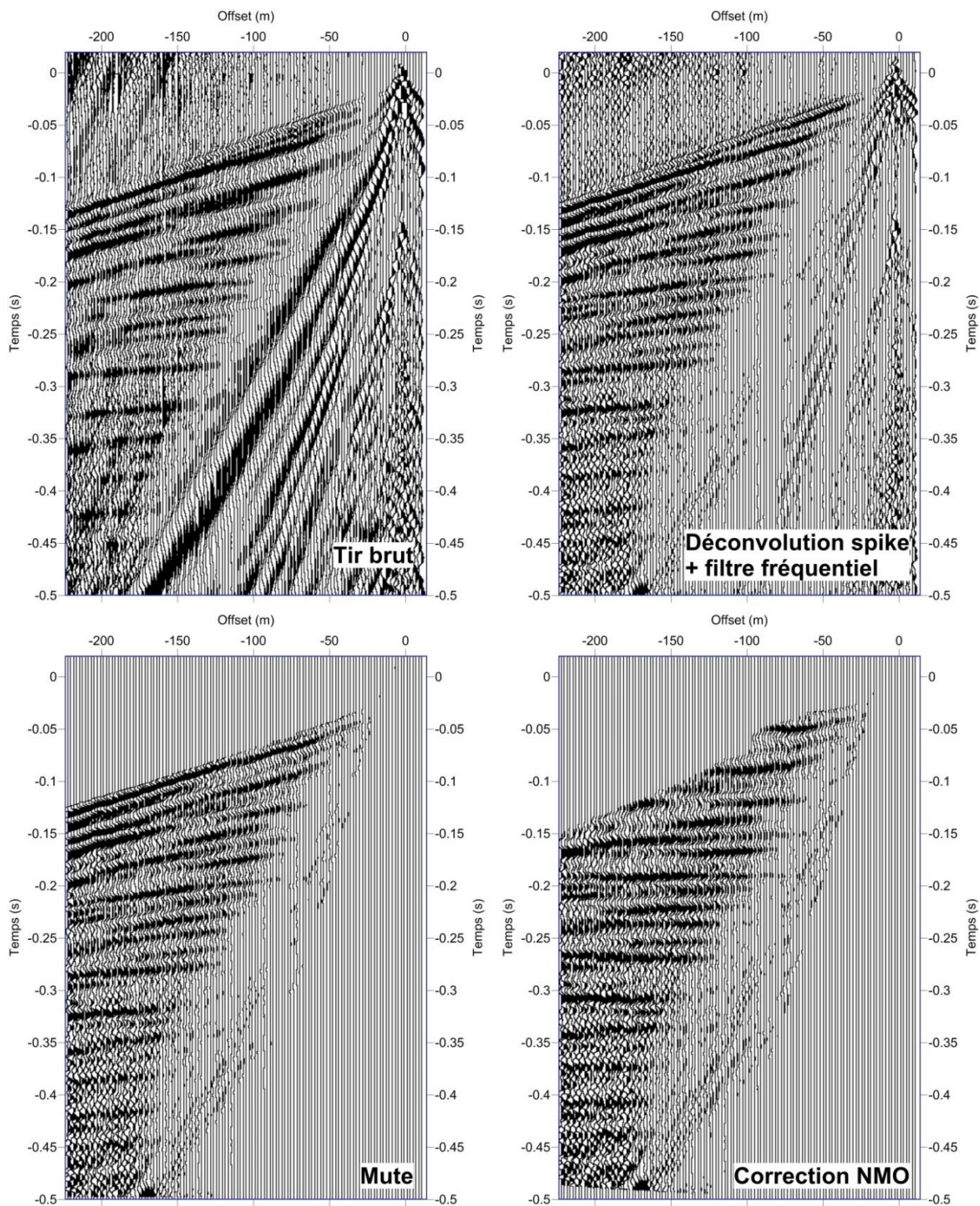
Le but du traitement est de convertir les données brutes enregistrées sur le terrain en sections sismiques montrant l'agencement des réflecteurs le long des profils. Ces réflecteurs donnent une image des différences de lithologie des couches du sous-sol. Le traitement des mesures est fait au moyen de séquences de programmes élaborés visant à faire ressortir les informations utiles - élimination des bruits parasites – et améliorer le pouvoir de résolution.

La séquence de traitement varie d'une étude à l'autre selon la profondeur de l'objectif, la nature des terrains et les paramètres d'enregistrement. Les séquences des traitements appliqués sur les données sont optimisées en fonction de la source utilisée, du dispositif d'acquisition, du contexte géologique et des objectifs recherchés.

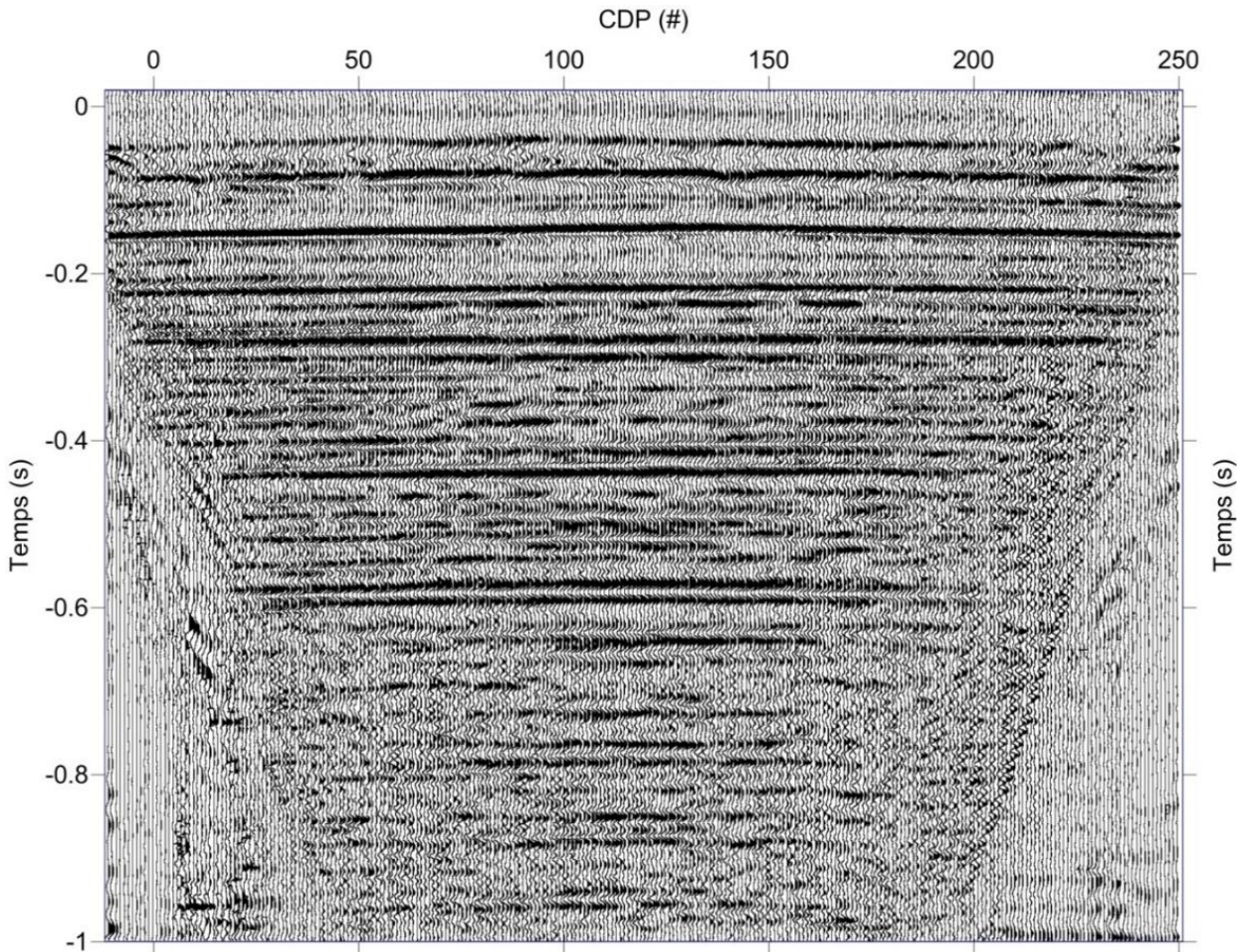
Pour les différents traitements, nous avons utilisé les programmes de SeismicUnix (SU). La séquence de traitement ci-après résume les étapes de traitement appliquées, et pour lesquelles de nombreux essais sont nécessaires :

- Contrôle de la géométrie
- Analyse de la qualité des données
- Correction statique du t0 et correction topographique
- AGC avec fenêtre glissante 200 ms
- Déconvolution spike maxlag = 0,003 s (Illustration page suivante)

- Filtre passe-bande (20-30-120-160 Hz) (Illustration page suivante)
- Mute chirurgical (ground-roll, premières arrivées et onde aérienne) (Illustration page suivante)
- Mise en collection CDP
- Analyse de vitesse
- Correction Normal Move Out (NMO) (Illustration page suivante)
- Correction statiques résiduelles en surface consistante
- Somme des points milieux communs (stack) (Illustration sur section stack pages suivantes)
- Déconvolution spatiale FX
- Migration temps de Stolt
- Conversion temps-profondeur (vitesses issues de la tomographie V_p)



Exemple d'étapes de traitement sismique réflexion réalisées sur un tir d'un profil avec espacement 2 m.



Exemple de section stack obtenue avec déconvolution spatiale FX.

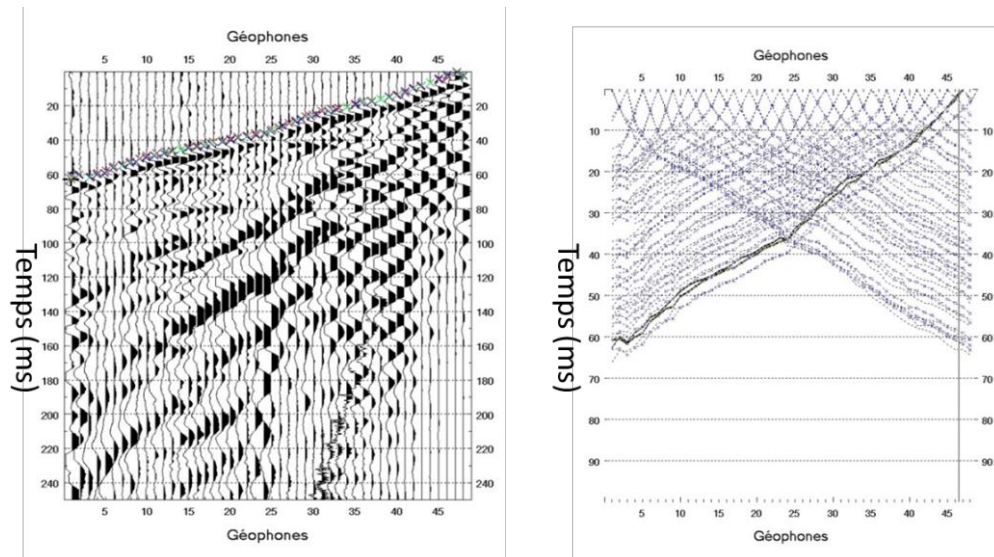
4. SISMIQUE RÉFRACTION

La sismique réfraction va s'intéresser aux premières arrivées d'ondes particulières, celles réfractées le long des interfaces entre deux couches puis réémises vers la surface (Illustration schéma première page). Basée sur l'étude des ondes de compression dans le sous-sol (ondes P), qui sont des indicateurs de la rigidité des terrains auscultés (*i.e.* indicateurs de compacité des terrains).

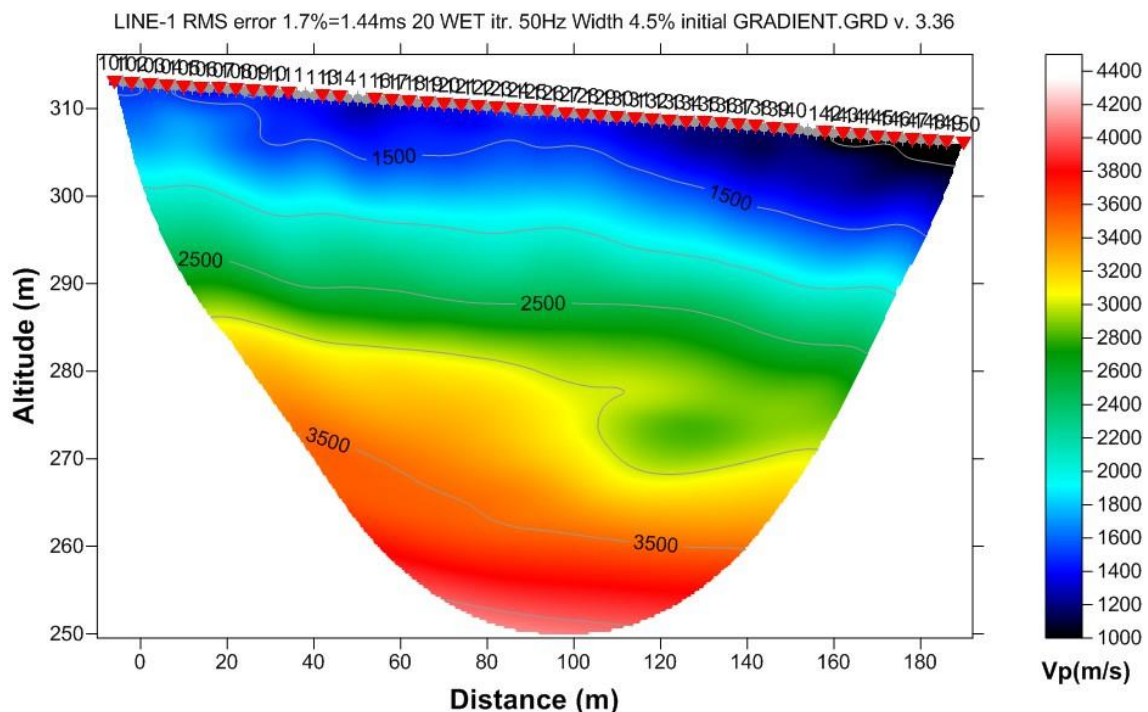
La méthode de la sismique réfraction permet d'obtenir la répartition dans le sol de la grandeur physique vitesse sismique des ondes P (V_p). On détermine, à partir de la mesure des temps de propagation des ondes P, la vitesse et l'épaisseur des différentes couches du sous-sol. La profondeur d'investigation dépend de la géométrie du dispositif de mesure et des vitesses sismiques en présence.

Les temps de propagation mesurés aux différents géophones (Illustration page suivante à gauche) sont reportées sur un graphique temps/géophone également appelé hodochrone (Illustration page suivante à droite) à partir duquel on détermine un modèle de vitesse V_p 2D en fonction de la profondeur par inversion des temps de propagation des ondes P directes et réfractées à l'aide d'un algorithme itératif WET (Wavepath Eikonal Tomography) (Schuster et al., 1993). Pour tous les profils traités en tomographie sismique réfraction, 20 itérations ont été réalisées. Pour juger de la fiabilité du modèle de V_p inversé, on effectue à chaque itération du

processus d'inversion une comparaison entre les hodochrones mesurées et les hodochrones synthétiques obtenues à partir du modèle de V_p inversé. L'erreur finale obtenue au sens des moindres carrés (RMS) pour tous les profils est inférieure à 2 %. Ce modèle de V_p est ensuite utilisé pour l'interprétation géologique (Illustration page suivante).



Exemples de pointés des temps de premières arrivées sismique de l'onde P (croix) sur un tir du profil (gauche). Ces temps d'arrivée sont représentés sous forme d'un diagramme temps/géophone (hodochrone) sur l'illustration de droite.



Modèle de vitesse des ondes P (V_p) obtenu par tomographie sismique réfraction.

Quelles que soient les performances des algorithmes de convergence, en l'absence d'étalonnage (V_p étalonnée, profondeur des interfaces) les résultats fournis par l'inversion ne sont pas définis

de manière univoque (il y a plusieurs solutions satisfaisant au même jeu de données). Cette indétermination ne peut être évaluée qu'en testant différentes solutions ou en contraignant l'inversion au moyen de paramètres (V_p , épaisseurs, profondeurs) obtenus par d'autres moyens (autre méthode géophysique, diagraphies, forages, observations des affleurements). Cet aspect sera traité dans le rapport final du projet.

Quelles que soient les performances des algorithmes de convergence, en l'absence d'étalonnage (e.g. V_p étalonnée, profondeur des interfaces), les résultats fournis par l'inversion ne sont pas définis de manière univoque (il y a plusieurs solutions satisfaisant au même jeu de données). Cette indétermination ne peut être évaluée qu'en testant différentes solutions ou en contraignant l'inversion au moyen de paramètres (e.g. V_p , épaisseurs, profondeurs) obtenus par d'autres moyens (e.g. autre méthode géophysique, diagraphies, forages, observations des affleurements).

Le tableau ci-dessous résume la séquence de traitement sismique réfraction.

Séquences de traitement	Descriptif de l'opération
Edition des traces	L'édition consiste à analyser chaque tir sismique de façon à juger de sa qualité et écarter les enregistrements trop bruités. Le bilan permet de savoir si l'opération de l'acquisition a rempli sa mission et si des cibles sont déjà visibles.
Corrections statiques de source	Cette étape permet de corriger le temps t_0 de début de chaque tir de manière à obtenir un t_0 constant sur l'ensemble des données sismiques. Elle est réalisée par l'analyse des temps d'arrivée sur les traces à offset 0 de tout le jeu de données. Ceci permet de s'affranchir des différences de temps de déclenchement de l'enregistrement.
Pointer des temps de premières arrivées de l'onde P	Cette opération permet de déterminer les temps de propagation de l'onde P entre chaque point de tir et les géophones de la ligne sismique. Le pointé de tous les enregistrements de la campagne ont été réalisés automatiquement avec une reprise manuelle lorsque cela s'avérait nécessaire.
Tracé des hodochrones	Cette étape est la base de l'interprétation graphique en sismique réfraction. On construit un diagramme temps-distance à partir des temps d'arrivée pointés. Les temps sont en ordonnée et les distances en abscisse.
Détermination de l'erreur sur le pointé	Cette opération permet d'appréhender l'erreur faite sur le pointé des temps de premières arrivées de l'onde P, par comparaison réciproque des temps entre un point source et un récepteur. L'erreur sur le pointé est obtenue en calculant l'écart type des erreurs individuelles de temps de trajets entre chaque couple source-récepteur.
Obtention d'un modèle de V_p par tomographie	Le modèle de vitesse est ici obtenu par l'inversion des temps de premières arrivées de l'onde P. Le processus itératif démarre d'un modèle de V_p initial puis met à jour ce modèle à chaque itération, de manière à minimiser progressivement les différences entre les temps de trajets pointés et les temps de trajets calculés obtenus à partir du modèle généré.

Séquence de traitement des données en tomographie sismique réfraction.

5. SISMIQUE MASW

La sismique MASW⁴⁷ repose sur l'étude de la propagation des ondes de surface. Elle permet d'étudier la propagation des ondes de compression (ondes P) et de cisaillement (ondes S) dans la très proche surface. Elle fournit des contraintes sur l'élasticité des terrains (onde P) et leur état (fracturation, saturation...).

Les ondes de surface se propagent parallèlement à la surface du sol (Illustration schéma page suivante). Dans le cas d'un milieu dont les propriétés élastiques varient avec la profondeur, la vitesse des ondes de surface varie avec la longueur d'onde et donc avec la fréquence. Cet effet

⁴⁷ Multiple Analysis of Surface Waves : Analyse multicanal des ondes de surface.

est appelé dispersion ; la MASW repose ainsi sur l'analyse des propriétés dispersives des ondes de surfaces. Suivant la fréquence considérée, les ondes de surfaces contiennent alors de l'information sur les milieux traversés, entre la surface et la profondeur maximale de pénétration des différentes fréquences du signal. En analysant la dispersion de ces ondes, il est donc possible d'obtenir des informations sur les valeurs de paramètres physiques à différentes profondeurs.

Un exemple de diagramme de dispersion est présenté sur l'illustration schéma page suivante (en haut à droite). Le pointé du maximum d'énergie (en rouge) dans le diagramme de dispersion donne les courbes de dispersion. La courbe de dispersion est une variation de la vitesse de phase en fonction de la fréquence. Comme pour la sismique réfraction, les courbes de dispersion sont inversées au cours d'un processus itératif qui permet de retrouver un modèle du sous-sol générant des données synthétiques compatibles avec les mesures (Illustration schéma ci-dessous en bas à droite). Une suite de programme BRGM basé notamment sur le logiciel Seismic Unix (Stockwell and Cohen, 1989) est utilisé pour effectuer le pré-traitement et le calcul des diagrammes de dispersion, ainsi que le pointé manuel des courbes de dispersion. Le logiciel Surf (Computer Programs in Seismology, Hermann ;1987) a été utilisé pour inverser les courbes de dispersion en profils de vitesse sismique cisailante 1D. Seule le mode fondamental de l'onde de Rayleigh a été considéré dans cette étude.

L'interpolation latérale en 2D des profils de vitesses 1D obtenus pour chaque tir permet d'obtenir la coupe de vitesse V_s sur le linéaire investigué (Illustration ci-dessous en bas à gauche). Cette dernière étape est réalisée en utilisant le logiciel Surfer (Golden software®).

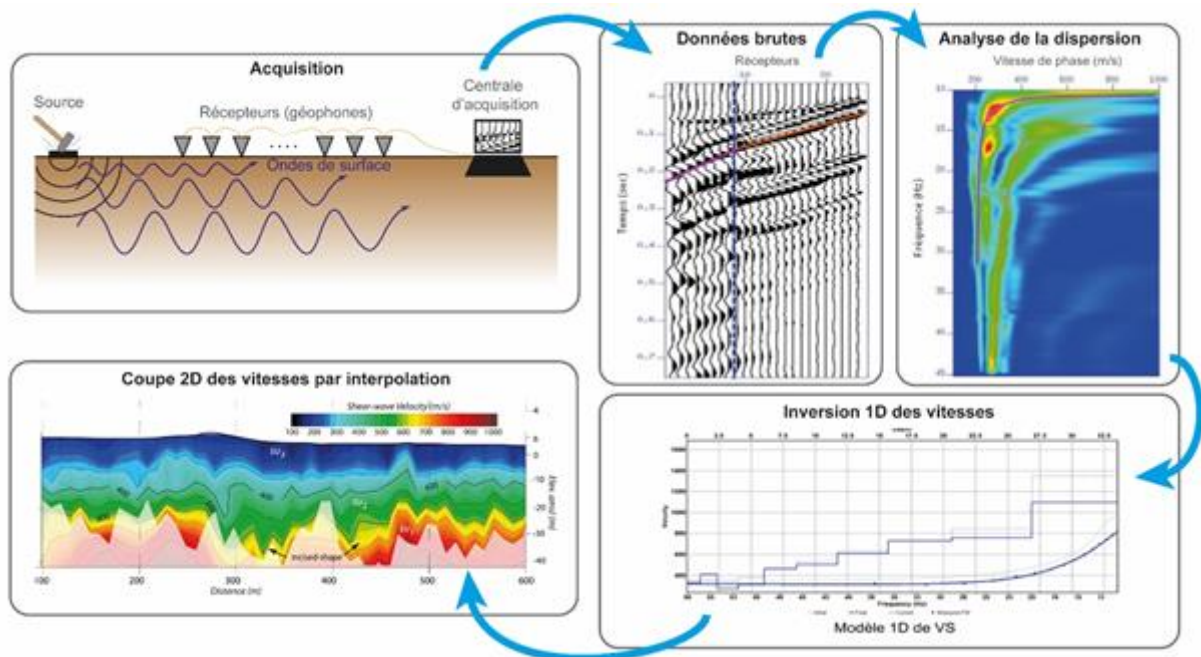


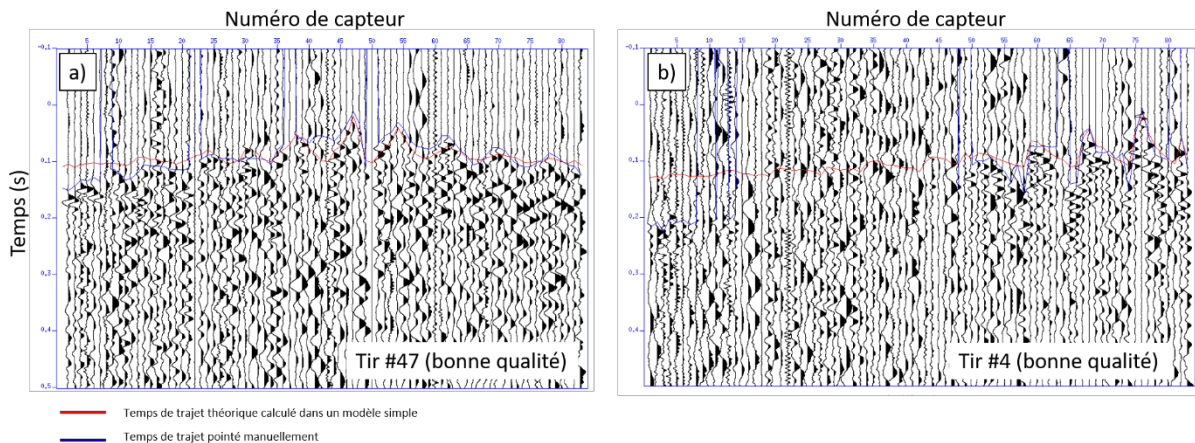
Schéma du principe de la méthode d'imagerie sismique MASW.

6. SISMOLOGIE 3-D

Les données issues de l'acquisition sismique 3-D ont été traitées suivant les étapes ci-après :

1. Extraction des données pour chaque tir sismique à partir des temps de déclenchement.
2. Sommation des tirs associés à la même position (somme entre 3 et 5 tirs).

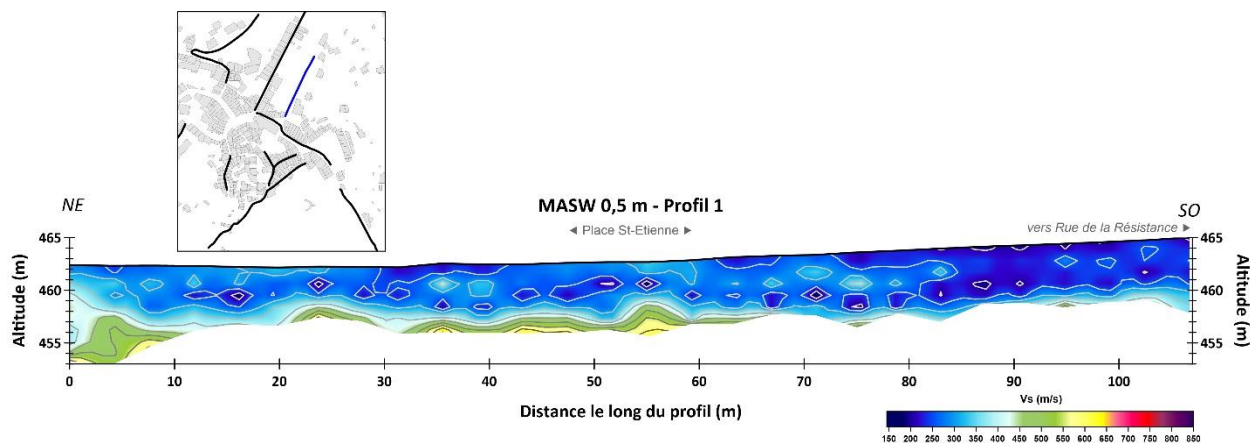
3. Création d'un fichier SU par position de tir, soit 149 fichiers SU de 83 traces (total de 12367 traces).
4. Premier pointé manuel des temps de première arrivée (tt_1) en classant les traces selon la distance à la source à l'aide du programme suxpicker.
5. Deuxième pointé manuel des temps de première arrivée (tt_2) en classant les traces selon le numéro de capteurs à l'aide du programme suxpicker.
6. Moyenne des deux pointés $tt_{obs} = (tt_1 + tt_2) * 0.5$, si et seulement si tt_1 et tt_2 existent.
7. Total de 8286 temps de première arrivée retenus (67 % du total initial).
8. Calcul des temps de premières arrivées théoriques (tt_{th}) dans un modèle 3D Vp simple latéralement homogène et avec augmentation linéaire de la vitesse avec la profondeur (gamme de vitesse Vp basée sur les résultats du profil de sismique réfraction). Utilisation du programme POLYTOMO3D pour le calcul des temps d'arrivée théorique (résolution de l'équation Eikonale).
9. Calcul des résidus $r = |tt_{obs} - tt_{th}|$ et statistique associée (moyenne des résidus μ , écart type des résidus σ).
10. Rejet des 5 % de tt_{obs} associés avec $r > (\mu + 2\sigma)$ (total de 7871 tt_{obs} retenus, soit 63 % du total initial).
11. Inversion 3D Vp des 7 871 temps d'arrivées retenus tt_{obs} à l'aide du programme POLYTOMO3D.



Exemple de données acquises pour le tir 47 (gauche) et 4 (droite) représentées en fonction du temps (ordonnée) et du numéro de capteur (abscisse). Les temps d'arrivée calculés dans un modèle simple et les temps d'arrivée pointés sont représentés par des lignes continues rouge et bleu. Les valeurs négatives (-0.1) correspondent au temps d'arrivée non pointés liés à la présence de traces trop bruitées.

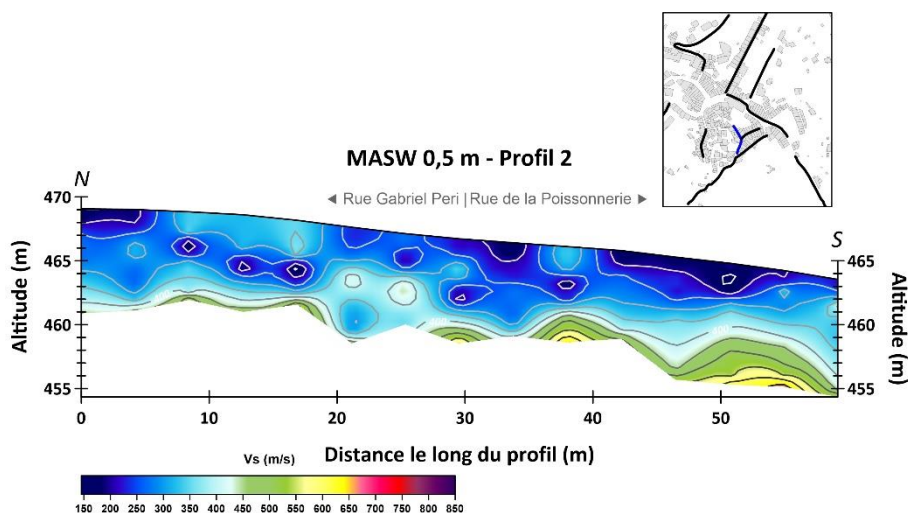
Annexe 6

Coupes de vitesses V_s (sismique MASW)



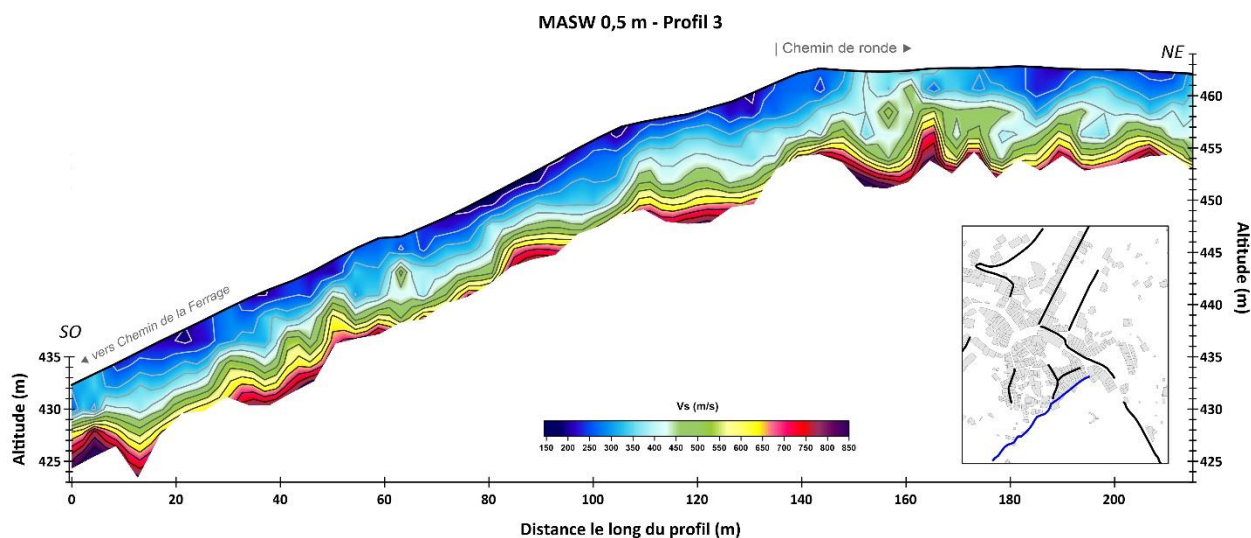
Coupe Vs du profil P1 (Place St-Etienne).

Le long du profil P1, les terrains superficiels sont globalement caractérisés par des Vs inférieures à 400 m/s. En se rapprochant du cœur du village, les vitesses Vs diminuent ($V_s < 250$ m/s à partir de l'abscisse 75-80 m).

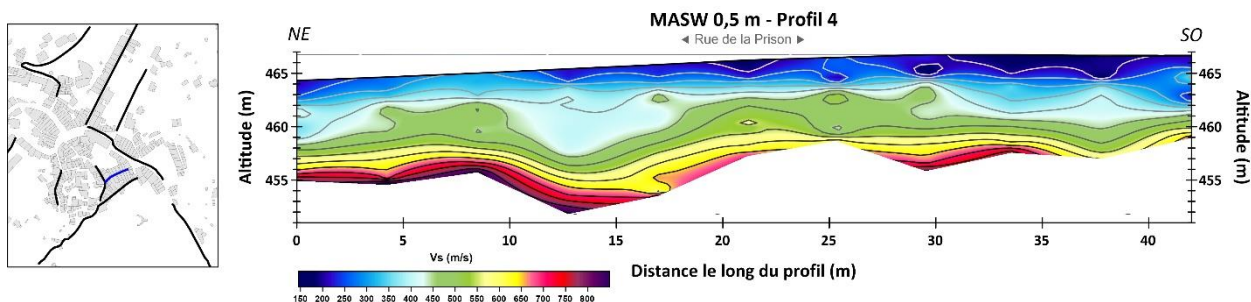


Coupe Vs du profil P2 (rue Gabriel Peri, rue de la Poissonnerie).

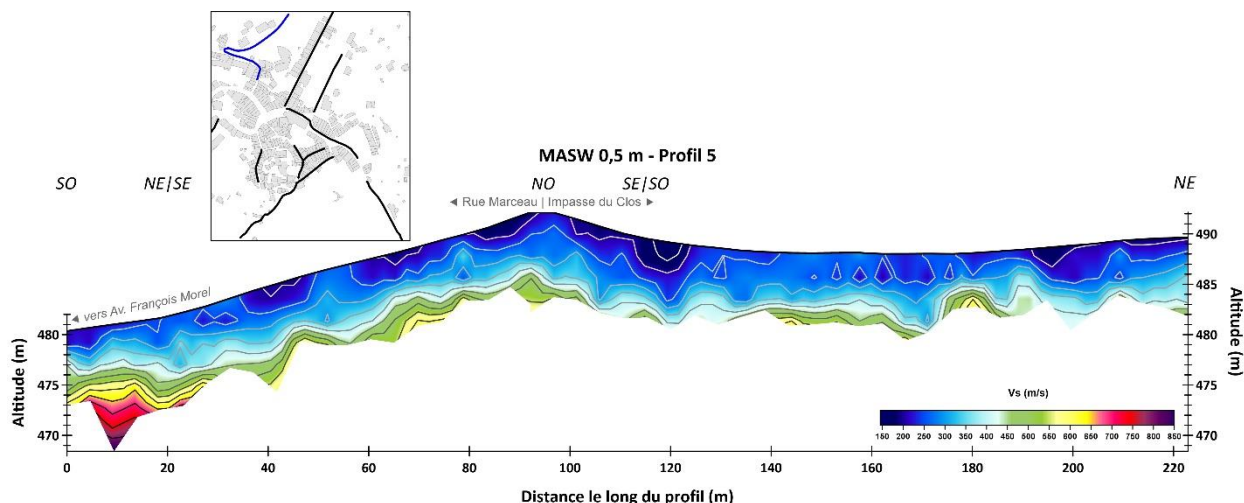
Le long du profil P2, les terrains superficiels sont globalement caractérisés par des Vs inférieures à 400 m/s. Localement, on observe des terrains très superficiels (1 ou 2 m d'épaisseur) à très faibles vitesses (< 200 m/s, entre 0 et 5 m d'abscisse ou encore 40 et 55 m d'abscisse par exemple). Vers le S, des terrains à Vs plus élevées (supérieure à 500 m/s) apparaissent progressivement vers 5 m de profondeur (à partir de l'abscisse 30 m).



Le long du profil P3, les terrains superficiels ont une Vs moyenne autour de 250-300 m/s. La profondeur atteinte, de l'ordre de 7 m, permet d'imager des terrains à Vs atteignant plus de 700-750 m/s.

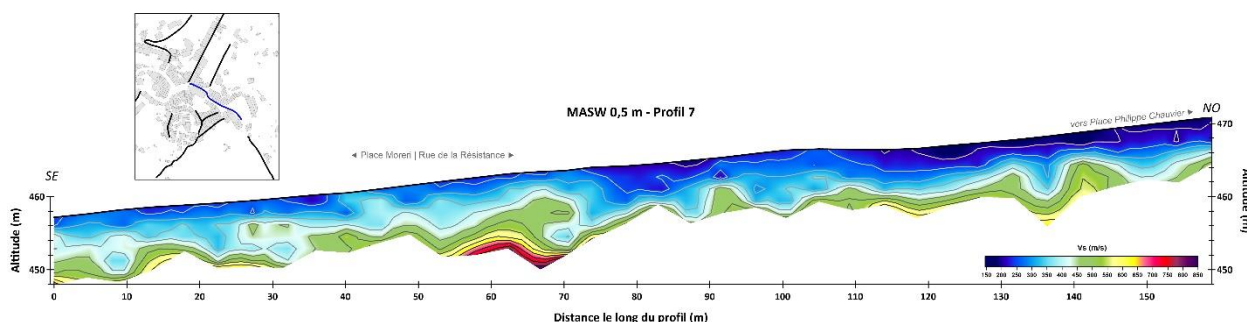


Le long du profil P4, les terrains superficiels ont une Vs moyenne autour de 300 m/s. Les terrains à Vs > 700 m/s sont également atteints vers 8 m de profondeur. On remarque une anomalie entre les abscisses 10 et 18 m, où les terrains à Vs > 450 forment une cuvette associée à une surépaisseur des terrains 350 m/s < Vs < 450 m/s.



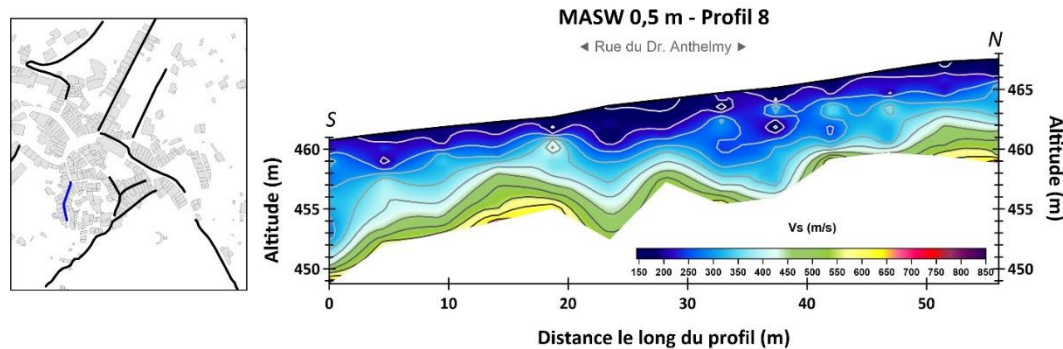
Coupe Vs du profil P5 (rue Marceau, impasse du Clos).

Le long du profil P5, atteint une profondeur moyenne d'environ 7 m. Il est constitué de terrain globalement caractérisés par des Vs lentes (< 300 m/s). Au centre du profil (entre les abscisses 80 et 125 m, i.e. en haut de la rue Marceau, et au début de l'impasse du Clos) ainsi à son extrémité NE (au bout de l'impasse), les 1-2 premiers mètres sont constitués de terrain à très faibles vitesses ($V_s \leq 200$ m/s). Au NE du profil, au-delà de l'abscisse 190 m, on observe des terrains à faibles Vs (≤ 400 m/s) jusqu'à 7 m de profondeur. Aux profondeurs maximales de la coupe, des terrains à Vs autour de 500 m/s sont atteints, localement des terrains à Vs > 700 m/s sont atteints (entre 0 et 20 m d'abscisse).



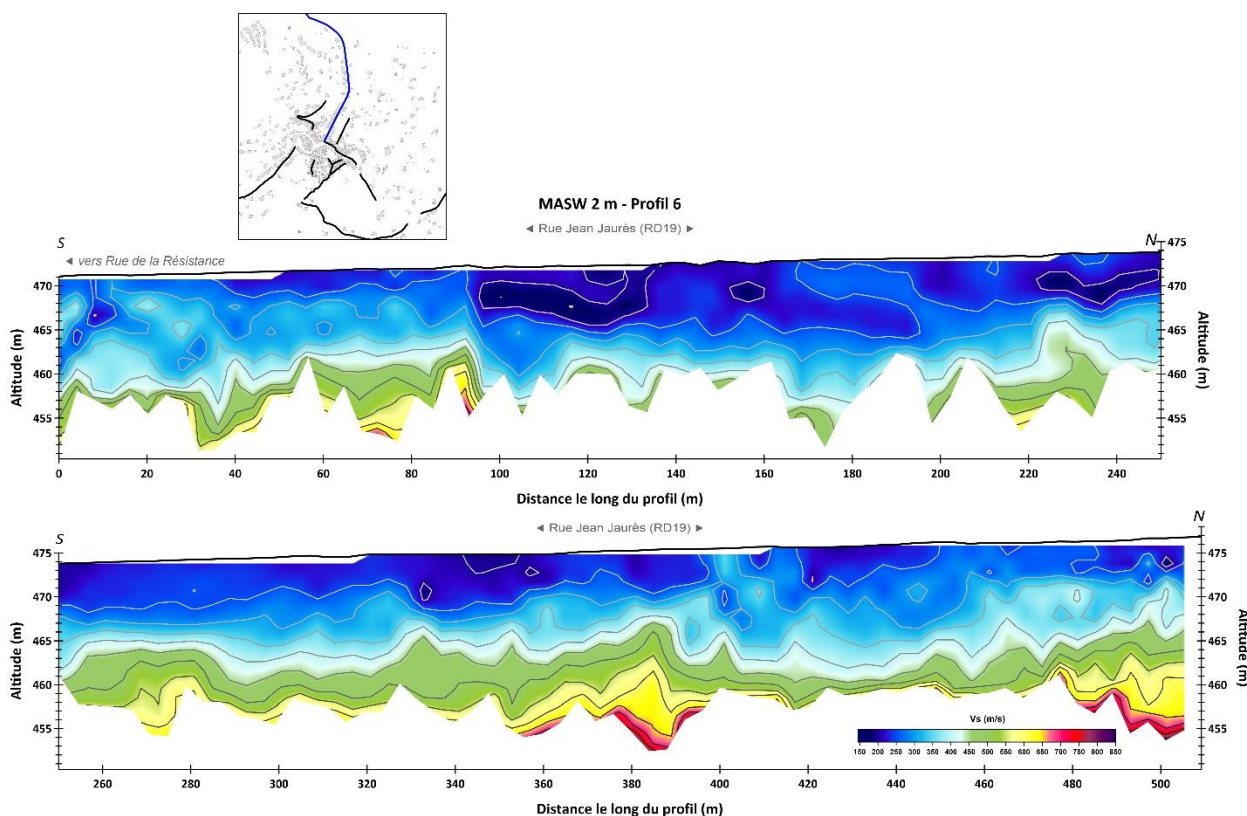
Coupe Vs du profil P7 (Place Moreri, rue de la Résistance).

Le long du profil P7, on observe un gradient de vitesse des terrains très superficiels (0-2 m de profondeur) depuis le NO ($V_s < 200$ m/s au-delà de l'abscisse 70 m) vers le SE ($200 < V_s < 300$ m/s, avant l'abscisse 70 m). Aux profondeurs maximales de la coupe, des terrains à Vs autour de 500-600 m/s sont atteints, localement des terrains à Vs > 700 m/s sont atteints (entre 55 et 70 m d'abscisse).



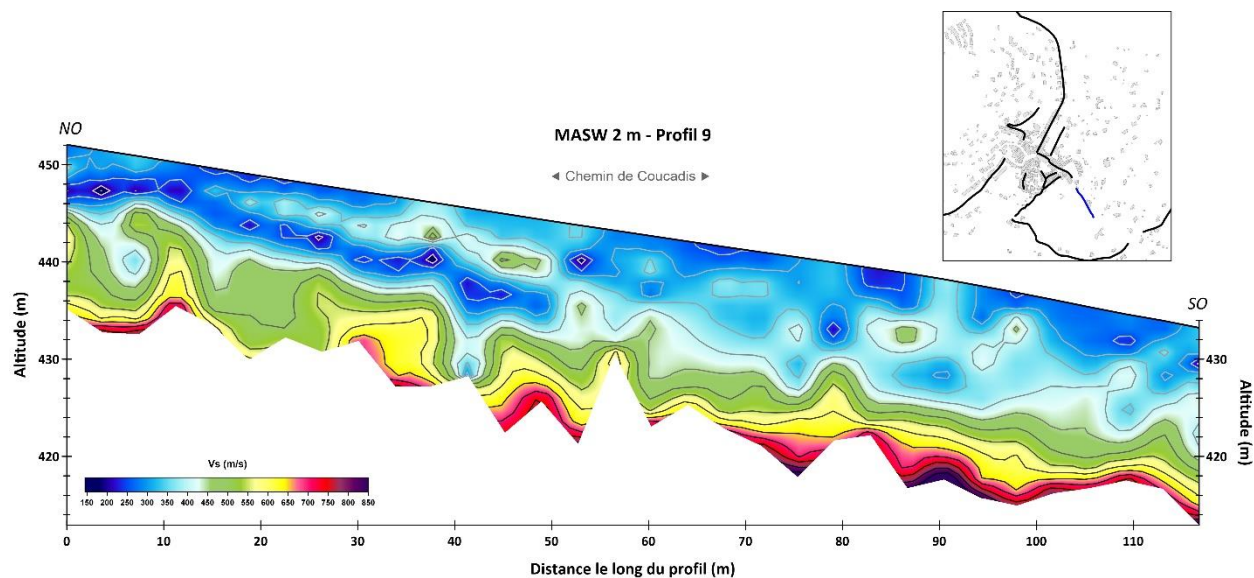
Coupe Vs du profil P8 (rue du Dr. Anthelmy).

Le profil P7 atteint une profondeur moyenne de 9 m environ. Il est caractérisé par un horizon superficiel continu d'environ 1,5 m d'épaisseur constitué de terrains à très faibles vitesses ($V_s < 200$ m/s). Des épaissements locaux de cet horizon sont observés (entre 18 et 33 m d'abscisse). Aux profondeurs maximales de la coupe, des terrains à V_s autour de 500-600 m/s sont atteints.



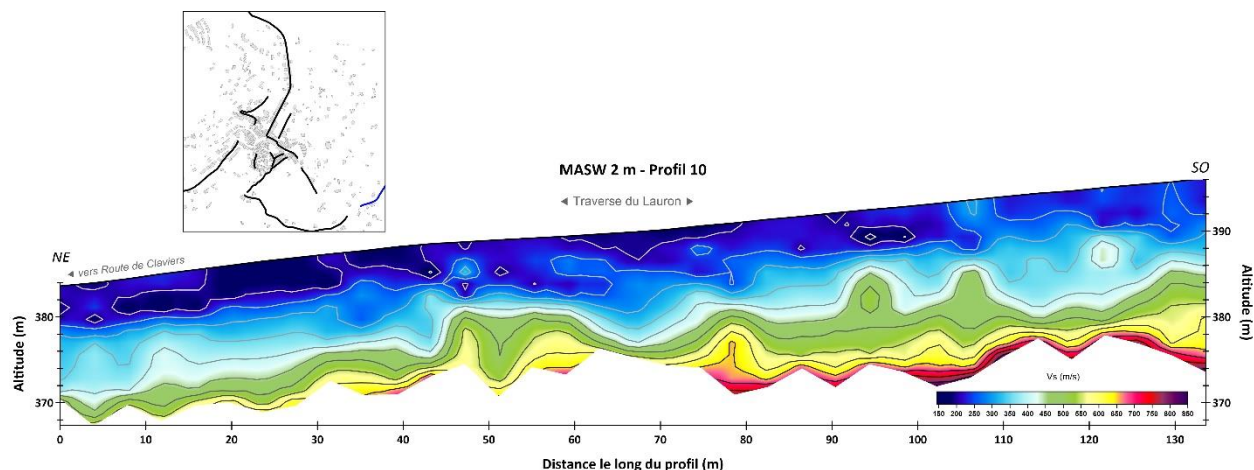
Coupe Vs du profil P6 (rue Jean Jaurès, RD19).

Le profil P6 est situé sur la RD19. On observe une variabilité latérale des V_s depuis le S vers le N. Entre 0 et 90 m d'abscisse, puis entre 400 et 505 m, les terrains superficiels (0-10 m) sont caractérisés par des V_s comprises entre 200 et 400 m/s. Entre 90 et 400 m d'abscisse, les vitesses sont plus lentes ($V_s < 250$ m/s).



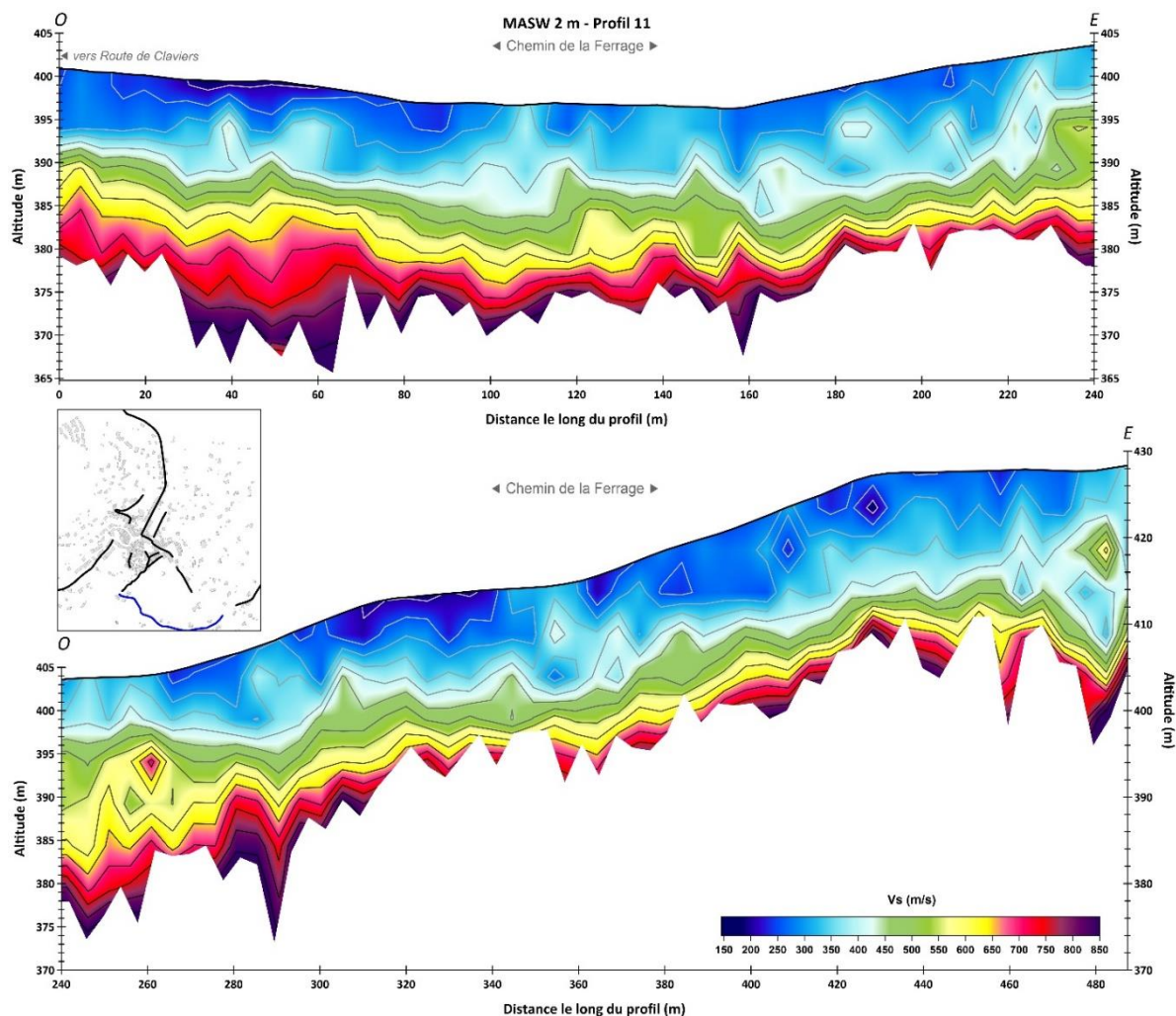
Coupe Vs du profil P9 (chemin de Coucadis).

Le profil P9, relativement bruité, présente une distribution des Vs assez hétérogène et difficile à décrire.



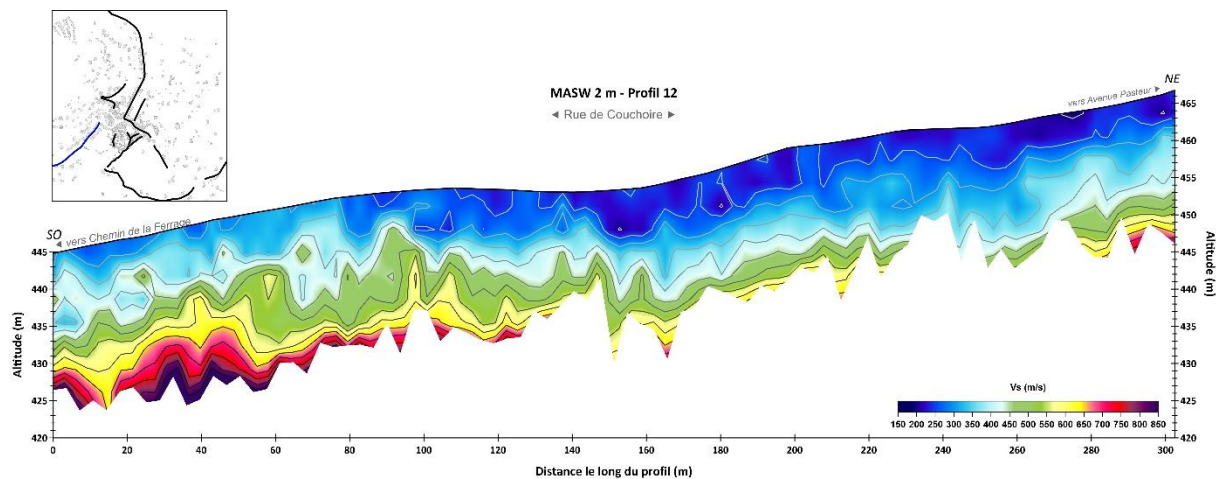
Coupe Vs du profil P10 (traverse du Lauron).

Le profil P10 montre des terrains superficiels caractérisés par de très faibles vitesses (< 250 m/s) et par un gradient du SO vers le NE, où les terrains superficiels ont des Vs moyennes d'environ 150 m/s.



Coupe Vs du profil P11 (chemin de la Ferrage).

Le profil P11 montre des terrains superficiels caractérisés par des Vs autour de 200-300 m/s. Ce profil atteint 20 m de profondeur et permet de visualiser des terrains à Vs élevées (jusqu'à 850 m/s).



Coupe Vs du profil P12 (rue de Couchoire).

Enfin, le profil P12 montre des terrains superficiels caractérisés par des Vs autour de 300-350 m/s entre 0 et 80 m d'abscisse, puis inférieures 250 m/s au-delà de 80 m d'abscisse. Des terrains à Vs élevées (jusqu'à 850 m/s) sont observés au-delà de 15 m de profondeur au SO. Ils ne sont plus identifiés après l'abscisse 140 m, où l'épaisseur des terrains à faible Vs augmente (elle passe d'environ 5-10 m au SO à 15 m ou plus au NE).

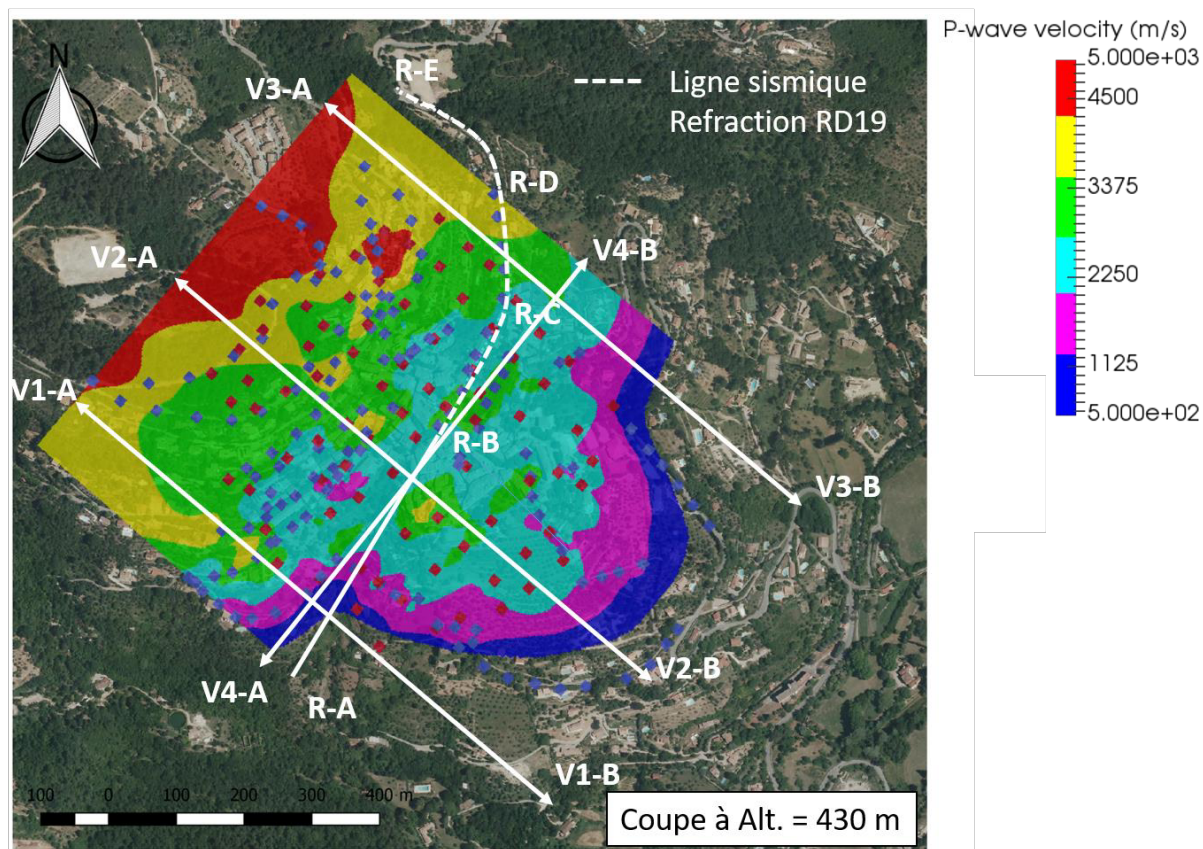
Annexe 7

Modèle sismique 3-D

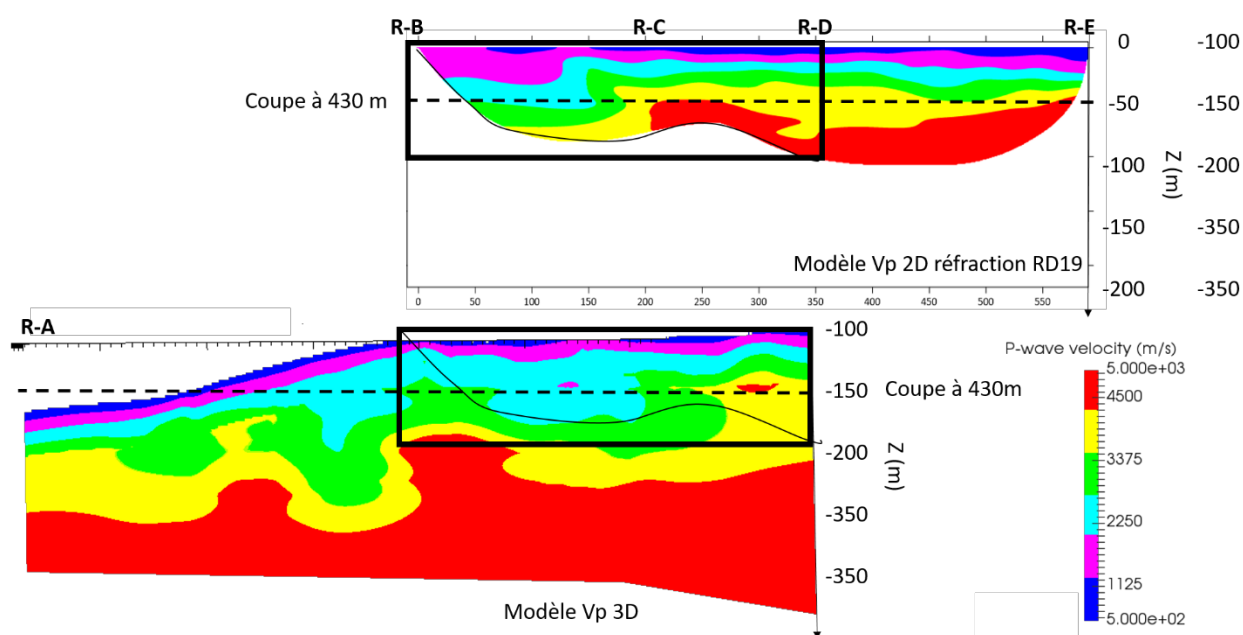
Le modèle 3D permet d'extrapoler les tendances observées le long du profil PS1 sur l'ensemble de la zone et dans toutes les dimensions. Une difficulté réside dans le fait que le modèle 3D a été construit à partir de données particulièrement bruitées et difficile à expliquer dans le processus d'inversion (le RMS ne chute que de 4 % entre le modèle initial (11 %) et le modèle final (7 %)). De plus, le modèle 3D offre une résolution beaucoup plus basse que le profil PS1. En contrepartie, le modèle 3D offre une profondeur d'investigation plus importante grâce à une plus grande ouverture (distance maximale entre les point de tirs et les récepteurs), et il tient en compte intrinsèquement les effets 3D, ce que ne permet pas le profil réfraction 2D.

La coupe de vitesse du modèle 3D à une altitude de 430 m est difficile à interpréter, mais elle montre au premier ordre que la vitesse V_p augmente avec la profondeur. Au second ordre, on observe des zones avec des vitesses plus lentes et plus rapide (anomalie) qui montre que le modèle est hétérogène ; mais il est difficile de conclure sur l'origine géologique de ces anomalies, tant leur étendue est restreinte devant la distance moyenne entre les capteurs sismiques.

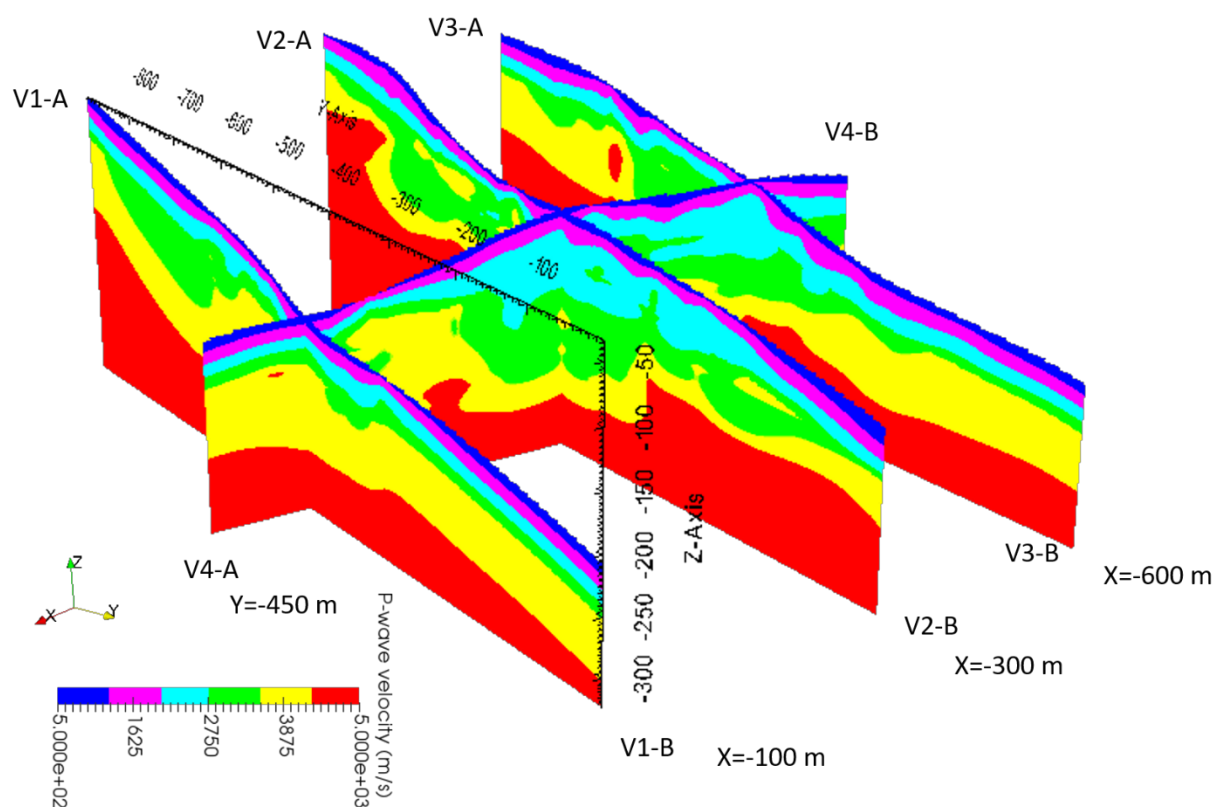
En comparant le long d'une coupe les résultats de la sismique réfraction de la RD19 et la ceux du modèle sismique 3D, on observe une cohérence avec notamment un surépaississement des terrains à plus faible vitesse (2 250 m/s) entre les abscisses 0 et 150 m, avec une remontée en surface des terrains à vitesse plus rapide (3 500 m/s) entre 200 m et 350 m d'abscisse. En suivant l'interprétation du profil sismique réfraction de la RD19 proposée dans la section précédente, les terrains à vitesse rapide (3 500 m/s et au-delà) pourraient correspondre aux dolomies et calcaires dolomitiques du Muschelkalk sup.). Par extrapolation, il est donc envisageable de proposer que la profondeur du toit de ces terrains dolomitiques ondule fortement, et parfois sur des longueurs d'onde spatiale d'une centaine de mètre environ, sur l'ensemble de la zone étudiée.



Coupe dans le modèle de vitesse V_p 3D à altitude constante de 430 m. La position des coupes à abscisses et ordonnées constantes présentées dans les figures suivantes sont indiquées avec des lignes blanches continues et pointillées et des labels. Les losanges rouges représentent les capteurs, les losanges violets, les positions de tirs.



Comparaison entre le modèle de vitesse 3D et le modèle de vitesse V_p obtenu par sismique réfraction le long de la RD19. Les positions des coupes sont indiquées dans la figure précédente.



Coupe dans le modèle de vitesse V_p 3D à abscisses et ordonnées constantes.

Annexe 8

Rapport d'étude géotechnique Hydrogéotechnique « réalisation de deux sondages carottés »

HYDROGÉOTECHNIQUE

Spécialistes en études de sol,
chaussée et environnement.



Ville de BARGEMON

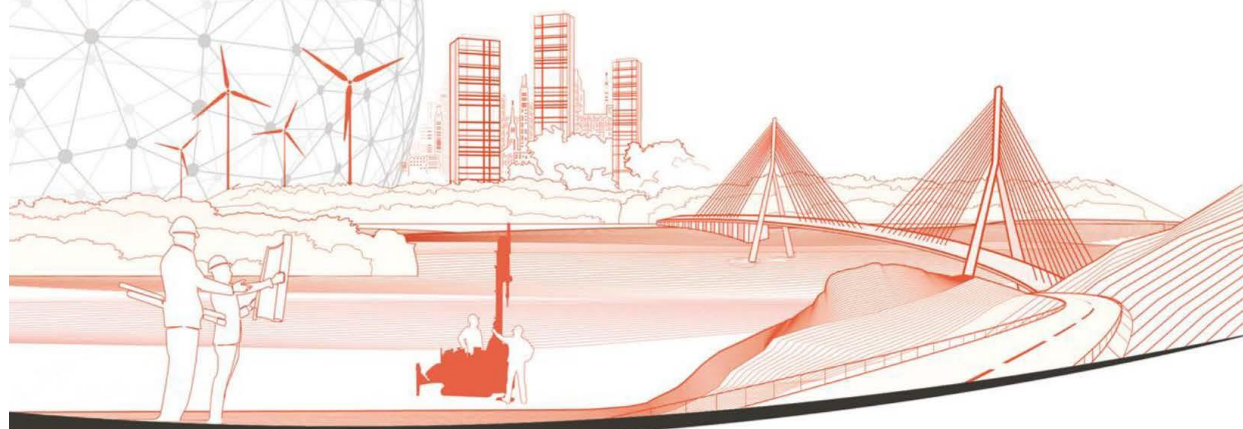
Rue de la résistance
83830 BARGEMON



Géosciences pour une Terre durable
brgm

BRGM

117 Avenue de Luminy
13276 MARSEILLE



RAPPORT D'ÉTUDE GÉOTECHNIQUE

Réalisation de deux sondages carottés

Compte rendu factuel des investigations – Article 6 – Norme NFP 94-500

BARGEMON (83830)

DOSSIER N°	INDICE	DATE	RÉDACTEUR	CONTRÔLEUR	SUPERVISEUR	OBSERVATIONS / MODIFICATIONS
C.22.50.009	A	21/03/2022	GCA	AGA	/	Première diffusion

Agence PACA / CORSE – 13 avenue d'Arménie – ZA de Bompertuis – 13120 GARDANNE – Tél : 04.42.65.88.21 – Mail : paca@hydrogeotechnique.com
SARL au capital de 68602Euros – SIRET 403 778 079 00109 – RCS AIX-EN-PROVENCE B403 778 079 – APE 71.12B / TVA FR92 403 778 079

Table des matières

1. INTRODUCTION	3
1.1. MISSIONS	3
1.2. DOCUMENTS FOURNIS	3
2. ÉTUDE GÉOTECHNIQUE PRÉLIMINAIRE DE SITE - MISSION G1 ES + PGC	4
2.1. CONTEXTES SITOLOGIQUE	4
2.2. CONTEXTE GÉOLOGIQUE	5
2.3. CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE	5
3. PROGRAMME SPÉCIFIQUE D'INVESTIGATIONS MIS EN ŒUVRE	6
3.1. PROGRAMME SPÉCIFIQUE	6
3.2. IMPLANTATION ET CALAGE ALTIMÉTRIQUE	6
ANNEXES	8
ANNEXE 1 PLAN D'IMPLANTATION DES SONDAGES	9
ANNEXE 2 Coupes des sondages carottés	10
ANNEXE 3 MISSIONS GÉOTECHNIQUES	11



1. INTRODUCTION

1.1. MISSIONS

Ce compte rendu factuel concerne la réalisation de deux forages carottés dans le cadre d'une convention de recherche sur le risque d'affaissement/effondrement lié à la dissolution du gypse mené par le **BRGM** pour la **Ville de Bargemon**.

Cette étude s'inscrit dans le cadre de la norme 94.500 des missions type d'ingénierie géotechnique de l'AFNOR-USG (Novembre 2013), qui suivent les étapes d'élaboration et de réalisation de tout projet, à savoir :

- **Article 6 : investigations géotechniques**

Cette mission se termine à la remise du présent rapport. Elle s'appuie sur des prestations d'investigations géotechniques proposées et réalisées par notre société.

Cette étude a été réalisée par **Geoffrey CADRAN** ingénieur en géotechnique, avec le contrôle interne de **Alexandre GARDAS**, Ingénieur Géotechnicien et Directeur d'agence.

Les objectifs de cette étude sont :

- Réaliser les forages, essais et mesures selon le programme imposé,
- Dépouiller les forages et essais conformément aux modes opératoires AFNOR correspondants,
- Fournir un compte-rendu factuel des différents résultats (coupes des sondages, procès-verbaux d'essais et résultats des mesures).

Le caractère de cette étude est strictement de type géotechnique. Les aspects liés à la recherche de pollution éventuelle ou à la caractérisation des ouvrages enterrés et des incidences des vestiges et fouilles archéologiques sont exclus.

1.2. DOCUMENTS FOURNIS

Pour mener à bien notre mission, les documents suivants nous ont été fournis :

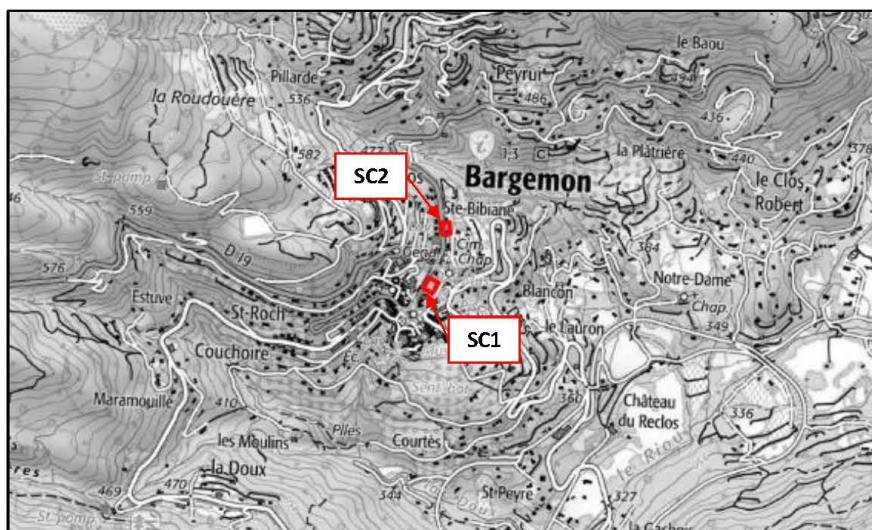
- Dossier de consultation d'entreprises pour des forages destructifs et carottés à Bargemon (Var)



2. ÉTUDE GÉOTECHNIQUE PRÉLIMINAIRE DE SITE - MISSION G1 ES + PGC

2.1. CONTEXTES SITOLOGIQUE

Les sondages se trouvent dans la rue Jean-Jaurès de la commune de BARGEMON (83). Les sondages sont implantés le long de la route départementale 19 menant au centre du village. Cette route est une double voie. La topographie est assez marquée et l'on se trouve au sommet de la colline où est implanté le village de Bargemon.



Extrait de la carte IGN en noir et blanc (source : www.geoportail.gouv.fr)



Vue satellite du projet (source : www.geoportail.gouv.fr)



2.2. CONTEXTE GÉOLOGIQUE

L'extrait de la carte géologique (éditions du BRGM) au 1/50 000^{ème} de FAYENCE montre que la zone d'étude se situe au niveau des formations suivantes :

- Remblais d'aménagement lié à l'aménagement des voiries et des habitations, cela est fonction de l'historique du site,
- Surmontant des formations meubles de faible épaisseur,
- Surmontant la formation du Muschelkalk (t2b) composée de calcaire.



Extrait de la carte géologique du BRGM (source : infoterre.brgm.fr)

2.3. CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE

Compte tenu du contexte sitologique et géologique, il est probable que des circulations d'eau puissent s'établir :

- En surface au sein des possibles remblais de voiries et formations superficielles,
- Sous forme de nappes de stagnation dans les poches perméables ou fracturées,
- A la faveur de la perméabilité des différentes couches de sol,
- A la faveur du jeu de fracturation du substratum de gypse.

3. PROGRAMME SPÉCIFIQUE D'INVESTIGATIONS MIS EN ŒUVRE

3.1. PROGRAMME SPÉCIFIQUE

Sur la base d'un programme et d'une implantation prédéfinie par le BRGM nous avons mis en œuvre les investigations suivantes les 22/02/2022 et 25/02/2022.

- **2 sondages carottés nommés SC1 et SC2, descendus à 20m de profondeur.** Pour cela, nous avons utilisé :
 - Un carottier en roto-percussion D116mm dans les formations meubles,
 - Un carottier rotatif D116mm dans les formations cohérentes.

Nota : Ces sondages ont été réalisés avec adduction d'eau salé conformes aux prescriptions du BRGM.

- **Le rebouchage des sondages a été réalisé avec un coulis de ciment injecté depuis le fond via des cannelures et une pompe à injection.**

3.2. IMPLANTATION ET CALAGE ALTIMÉTRIQUE

Le plan d'implantation des sondages est présenté en annexe du rapport.

Les profondeurs indiquées sur les sondages ont été prises par rapport à la tête du sondage. Nous n'avons pas pu relever les coordonnées du carotté **SC1**, car la précision satellite était médiocre.

	X	Y
SC1	Pas de données	
SC2	986731.898	6286793.277



Ville de Bargemon – BRGM – Réalisation de deux forages dans le gypse

Notre mission se termine à la remise du présent compte-rendu qui constitue un ensemble indissociable.

Nous restons à la disposition de **LA VILLE DE BARGEMON ET LE BRGM** ainsi que tous les intervenants pour tous renseignements complémentaires.

Dressé par les Ingénieurs soussignés

Dressé par le chargé d'étude :	Vérifié par l'ingénieur soussigné
Geoffrey CADRAN	Alexandre GARDAS
	



RÉFÉRENCE : C.22.50.009
INDICE : A

PAGE 7

Ville de Bargemon – BRGM – Réalisation de deux forages dans le gypse

ANNEXES



RÉFÉRENCE : C.22.50.009
INDICE : A

PAGE 8

ANNEXE 1

PLAN D'IMPLANTATION DES SONDAGES



PLAN D'IMPLANTATION DES SONDAGES CAROTTES



Légende :

● Sondage carotté

ANNEXE 2

COUPES DES SONDAGES CAROTTES ET PLANCHES PHOTOGRAPHIQUE



RÉFÉRENCE : C.22.50.009
INDICE : A

PAGE 10

	Ville de BARGEMON Réalisation de deux forages dans le gypse BARGEMON (83)		N° dossier C.22.50.009
	Date : 22/02/2022	Machine : H750	Profondeur : 0,00 - 20,00 m

1/100

Sondage carotté : SC1

EXGTE B3.21.2/LB2EPF580FR

Prof (m)	Lithologie	Niveau d'eau	Tubage	Outil	Récupération %	Commentaires
0	Enrobé noir	Forage à l'eau : pas de niveau significatif	Neant	Carottier roto-percussion Ø116mm	70	
0,05 m	Grave anguleuse grise noire				100	
0,40 m	Lim on sableux marron très foncé noir				100	
1,20 m	Argile limoneuse maron/grise/ocre à cailloutis et cailloux				90	
2,80 m	Argile +/- marneuse bariolée marron/grise/ocre/rouge à quelques cailloutis				75	
3,90 m				Carottier rotatif Ø116mm	70	
					100	
					100	
					90	
					100	
12,70 m					100	
					100	
					100	
15,00 m					100	
					100	
					100	
18,00 m					100	
					100	
20,00 m					100	

Logiciel JEAN LUTZ S.A. - www.jeanlutzsa.fr

 HYDROGEOTECHNIQUE	Ville de BARGEMON Réalisation de deux forages dans le gypse BARGEMON (83)
	PLANCHE PHOTOGRAPHIQUE du sondage de reconnaissance géologique

SC1 (0 – 20m)

		
0m		1,5m
1,5m		2,5m
2,5m		3,5m
3,5m		4,5m
4,5m		6,0m
5,9m		7,2m

C.22.50009

7,2m		8,3m
8,3m		9,4m
9,4m		10,4 m
10,4 m		11,4 m
11,4 m		12,4 m
12,4 m		13,4 m
13,4 m		14,4 m
14,4 m		15,3 m

C.22.50009



C.22.50009

	Ville de BARGEMON Réalisation de deux forages dans le gypse BARGEMON (83)		N° dossier C.22.50009
	Date : 23/02/2022	Machine : H750	Profondeur : 0,00 - 20,00 m X : 986731.898 Y : 6286793.277

1/100

Sondage carotté : SC2

EXGTE B3.21.2/LB2EPF580FR

Prof (m)	Lithologie		Niveau d'eau	Outil	Tubage	Récupération %	RQD %	
0		Enrobé noir	Forage à l'eau - Niveau d'eau non significatif	Carottier robo-percussion Ø116mm	Néant			
0,05 m						65		
1		Grave anguleuse grise noire						
0,25 m						60		
2		Argile limoneuse grise/ocre/marron à cailloutis et cailloux					100	
3,00 m							100	
3		Argile +/- marneuse bariolée marron/grise/rouge/ocre à cailloutis					100	
4,00 m							100	
4							100	
5							100	
6							100	
7		Argile marneuse marron/rouge/grise					100	
8							100	
9							100	
10				Carottier rotatif Ø116mm	Néant	65		
10,30 m						100		
11								
12		Argile gypseuse marron/grise/blanche						
13,50 m						55		
14						100	100	
15						70	50	
16						100	45	
17		Gypse gris/blanc/noir à passées marneuse marron + passées orange				100	90	
18						100	80	
19						100		
20,00 m							100	

Logiciel JEAN LUTZ S.A. - www.jeanlutzsa.fr

 HYDROGEOTECHNIQUE	Ville de BARGEMON Réalisation de deux forages dans le gypse BARGEMON (83)
	PLANCHE PHOTOGRAPHIQUE du sondage de reconnaissance géologique

SC2 (0 – 20m)



C.22.50009

7,0m		8,0m
8,0m		8,7m
8,7m		9,7m
9,7m		10,5 m
10,5 m		11,7 m
11,7 m		13,5 m
13,5 m		14,5 m
14,5 m		15,5 m

C.22.50009



C.22.50009

ANNEXE 3

MISSIONS GÉOTECHNIQUES



RÉFÉRENCE : C.22.50.009
INDICE : A

PAGE 11

CLASSIFICATION DES MISSIONS TYPE D'INGÉNIERIE GÉOTECHNIQUE (extraite de la norme NF P 94-500 - novembre 2013)

L'enchaînement des missions d'ingénierie géotechnique (étapes 1 à 3) doit suivre les étapes de conception et de réalisation de tout projet pour contribuer à la maîtrise des risques géotechniques. Le maître d'ouvrage ou son mandataire doit faire réaliser successivement chacune de ces missions par une ingénierie géotechnique. Chaque mission s'appuie sur des données géotechniques adaptées issues d'investigations géotechniques appropriées.

ÉTAPE 1 : ÉTUDE GÉOTECHNIQUE PRÉALABLE (G1)

Cette mission exclut toute approche des quantités, délais et coûts d'exécution des ouvrages géotechniques qui entre dans le cadre de la mission d'étude géotechnique de conception (étape 2). Elle est à la charge du maître d'ouvrage ou son mandataire. Elle comprend deux phases :

Phase Étude de site (ES)

Elle est réalisée en amont d'une étude préliminaire d'esquisse ou d'APS pour une première identification des risques géotechniques d'un site.

- Faire une enquête documentaire sur le cadre géotechnique du site et l'existence d'avoisinants avec visite du site et des alentours.
- Définir si besoin un programme d'investigations géotechniques spécifique, le réaliser ou en assurer le suivi technique, en exploiter les résultats.
- Fournir un rapport donnant pour le site étudié un modèle géologique préliminaire, les principales caractéristiques géotechniques et une première identification des risques géotechniques majeurs.

Phase Principes Généraux de Construction (PGC)

Elle est réalisée au stade d'une étude préliminaire, d'esquisse ou d'APS pour réduire les conséquences des risques géotechniques majeurs identifiés. Elle s'appuie obligatoirement sur des données géotechniques adaptées.

- Définir si besoin un programme d'investigations géotechniques spécifique, le réaliser ou en assurer le suivi technique, en exploiter les résultats,
- Fournir un rapport de synthèse des données géotechniques à ce stade d'étude (première approche de la ZIG, horizons porteurs potentiels, ainsi que certains principes généraux de construction envisageables (notamment fondations, terrassements, ouvrages enterrés, améliorations de sols).

ÉTAPE 2 : ÉTUDE GÉOTECHNIQUE DE CONCEPTION (G2)

Cette mission permet l'élaboration du projet des ouvrages géotechniques et réduit les conséquences des risques géotechniques importants identifiés. Elle est à la charge du maître d'ouvrage ou son mandataire et est réalisée en collaboration avec la maîtrise d'œuvre ou intégrée à cette dernière. Elle comprend trois phases :

Phase Avant-Projet (AVP)

Elle est réalisée au stade de l'avant-projet de la maîtrise d'œuvre et s'appuie obligatoirement sur des données géotechniques adaptées.

- Définir si besoin un programme d'investigations géotechniques spécifique, le réaliser ou en assurer le suivi technique, en exploiter les résultats,
- Fournir un rapport donnant les hypothèses géotechniques à prendre en compte au stade de l'avant-projet, les principes de construction envisageables (terrassements, soutènements, pentes et talus, fondations, assises des dallages et voiries, améliorations de sols, dispositions générales vis-à-vis des nappes et des avoisinants), une ébauche dimensionnelle par type d'ouvrage géotechnique et la pertinence d'application de la méthode observationnelle pour une meilleure maîtrise des risques géotechniques.

Phase Projet (PRO)

Elle est réalisée au stade du projet de la maîtrise d'œuvre et s'appuie obligatoirement sur des données géotechniques adaptées suffisamment représentatives pour le site.

- Définir si besoin un programme d'investigations géotechniques spécifique, le réaliser ou en assurer le suivi technique, en exploiter les résultats,
- Fournir un dossier de synthèse des hypothèses géotechniques à prendre en compte au stade du projet (valeurs caractéristiques des paramètres géotechniques en particulier), des notes techniques donnant les choix constructifs des ouvrages géotechniques (terrassements, soutènements, pentes et talus, fondations, assises des dallages et voiries, améliorations de sols, dispositions vis-à-vis des nappes et des avoisinants), des notes de calcul de dimensionnement, un avis sur les valeurs seuils et une approche des quantités.

Phase DCE / ACT

Elle est réalisée pour finaliser le Dossier de Consultation des Entreprises et assister le maître d'ouvrage pour l'établissement des Contrats de Travaux avec le ou les entrepreneurs retenus pour les ouvrages géotechniques.

- Établir ou participer à la rédaction des documents techniques nécessaires et suffisants à la consultation des entreprises pour leurs études de réalisation des ouvrages géotechniques (dossier de la phase Projet avec plans, notices techniques, cahier des charges particulières, cadre de bordereau des prix et estimatif, planning prévisionnel).
- Assister éventuellement le maître d'ouvrage pour la sélection des entreprises, analyser les offres techniques, participer à la finalisation des pièces techniques des contrats de travaux.



ÉTAPE 3 : ÉTUDES GÉOTECHNIQUES DE RÉALISATION (G3 et G4, distinctes et simultanées)

→ ÉTUDE ET SUIVI GÉOTECHNIQUES D'EXÉCUTION (G3)

Cette mission permet de réduire les risques géotechniques résiduels par la mise en œuvre à temps de mesures correctives d'adaptation ou d'optimisation. Elle est confiée à l'entrepreneur sauf disposition contractuelle contraire, sur la base de la phase G2 DCE/ACT.

Elle comprend deux phases interactives :

Phase Étude

- Définir si besoin un programme d'investigations géotechniques spécifique, le réaliser ou en assurer le suivi technique, en exploiter les résultats.
- Étudier dans le détail les ouvrages géotechniques : notamment établissement d'une note d'hypothèses géotechniques sur la base des données fournies par le contrat de travaux ainsi que des résultats des éventuelles investigations complémentaires, définition et dimensionnement (calculs justificatifs) des ouvrages géotechniques, méthodes et conditions d'exécution (phasages généraux, suivis, auscultations et contrôles à prévoir, valeurs seuils, dispositions constructives complémentaires éventuelles).
- Elaborer le dossier géotechnique d'exécution des ouvrages géotechniques provisoires et définitifs : plans d'exécution, de phasage et de suivi.

Phase Suivi

- Suivre en continu les auscultations et l'exécution des ouvrages géotechniques, appliquer si nécessaire des dispositions constructives prédéfinies en phase étude.
- Vérifier les données géotechniques par relevés lors des travaux et par un programme d'investigations géotechniques complémentaire si nécessaire (le réaliser ou en assurer le suivi technique, en exploiter les résultats).
- Établir la prestation géotechnique du dossier des ouvrages exécutés (DOE) et fournir les documents nécessaires à l'établissement du dossier d'interventions ultérieures sur l'ouvrage (DIUO).

→ SUPERVISION GÉOTECHNIQUE D'EXÉCUTION (G4)

Cette mission permet de vérifier la conformité des hypothèses géotechniques prises en compte dans la mission d'étude et suivi géotechniques d'exécution. Elle est à la charge du maître d'ouvrage ou son mandataire et est réalisée en collaboration avec la maîtrise d'œuvre ou intégrée à cette dernière. Elle comprend deux phases interactives :

Phase Supervision de l'étude d'exécution :

- Donner un avis sur la pertinence des hypothèses géotechniques de l'étude géotechnique d'exécution, des dimensionnements et méthodes d'exécution, des adaptations ou optimisations des ouvrages géotechniques proposées par l'entrepreneur, du plan de contrôle, du programme d'auscultation et des valeurs seuils.

Phase Supervision du suivi d'exécution :

- Par interventions ponctuelles sur le chantier, donner un avis sur la pertinence du contexte géotechnique tel qu'observé par l'entrepreneur (G3), du comportement tel qu'observé par l'entrepreneur de l'ouvrage et des avoisinants concernés (G3), de l'adaptation ou de l'optimisation de l'ouvrage géotechnique proposée par l'entrepreneur (G3).
- Donner un avis sur la prestation géotechnique du DOE et sur les documents fournis par le DIUO.

DIAGNOSTIC GÉOTECHNIQUE (G5)

Pendant le déroulement d'un projet ou au cours de la vie d'un ouvrage, il peut être nécessaire de procéder, de façon strictement limitative, à l'étude d'un ou plusieurs éléments géotechniques spécifiques, dans le cadre d'une mission ponctuelle. Ce diagnostic géotechnique précise l'influence de cet ou ces éléments géotechniques sur les risques géotechniques identifiés ainsi que leurs conséquences possibles pour le projet ou l'ouvrage existant.

- Définir, après enquête documentaire, un programme d'investigations géotechniques spécifique, le réaliser ou en assurer le suivi technique, en exploiter les résultats.
- Étudier un ou plusieurs éléments géotechniques spécifiques (par exemple soutènement, causes géotechniques d'un désordre) dans le cadre de ce diagnostic, mais sans aucune implication dans la globalité du projet ou dans l'étude de l'état général de l'ouvrage existant.
- Si ce diagnostic conduit à modifier une partie du projet ou à réaliser des travaux sur l'ouvrage existant, des études géotechniques de conception et/ou d'exécution ainsi qu'un suivi et une supervision géotechniques seront réalisés ultérieurement, conformément à l'enchaînement des missions d'ingénierie géotechnique (étape 2 et/ou 3).



SCHÉMA D'ENCHAÎNEMENT DES MISSIONS GÉOTECHNIQUES
(extrait de la norme NFP 94-500 - Novembre 2013)

Enchaînement des missions G1 à G4	Phases de la maîtrise d'œuvre	Mission d'ingénierie géotechnique (GN) et Phase de la mission		Objectifs à atteindre pour les ouvrages géotechniques	Niveau de management des risques géotechniques attendu	Prestations d'investigations géotechniques à réaliser
Étape 1 : Étude géotechnique préalable (G1)		Étude géotechnique préalable (G1) Phase Etude de Site (ES)		Spécificités géotechniques du site	Première identification des risques présentés par le site	Fonction des données existantes et de la complexité géotechnique
	Étude préliminaire, esquisses, APS	Étude géotechnique préalable (G1) Phase Principes Généraux de Construction (PGC)		Première adaptation des futurs ouvrages aux spécificités du site	Première identification des risques pour les futurs ouvrages	Fonction des données existantes et de la complexité géotechnique
Étape 2 : Étude géotechnique de conception (G2)	APD/AVP	Étude géotechnique de conception (G2) Phase Avant-Projet (AVP)		Définition et comparaison des solutions envisageables pour le projet	Mesures préventives pour la réduction des risques identifiés, mesures correctives pour les risques résiduels avec détection au plus tôt de leur survenance	Fonction du site et de la complexité du projet (choix constructifs)
	PRO	Étude géotechnique de conception (G2) Phase Projet (PRO)		Conception et justifications du projet		Fonction du site et de la complexité du projet (choix constructifs)
	DCE/ACT	Étude géotechnique de conception (G2) Phase DCE / ACT		Consultation sur le projet de base / Choix de l'entreprise et mise au point du contrat de travaux		
Étape 3 : Études géotechniques de réalisation (G3/G4)		À la charge de l'entreprise	À la charge du maître d'ouvrage			
	EXE/VISA	Étude et suivi géotechniques d'exécution (G3) Phase Etude (en interaction avec la phase Suivi)	Supervision géotechnique d'exécution (G4) Phase Supervision de l'étude géotechnique d'exécution (en interaction avec la phase Supervision du suivi)	Étude d'exécution conforme aux exigences du projet, avec maîtrise de la qualité, du délai et du coût	Identification des risques résiduels, mesures correctives, contrôle du management des risques résiduels (réalité des actions, vigilance, mémorisation, capitalisation des retours d'expérience)	Fonction des méthodes de construction et des adaptations proposées si des risques identifiés surviennent
	DET/AOR	Étude et suivi géotechniques d'exécution (G3) Phase Suivi (en interaction avec la phase Etude)	Supervision géotechnique d'exécution (G4) Phase Supervision de l'étude géotechnique d'exécution (en interaction avec la phase Supervision de l'étude)	Exécution des travaux en toute sécurité et en conformité avec les attentes du maître d'ouvrage		Fonction du contexte géotechnique observé et du comportement de l'ouvrage et des avoisinants en cours de travaux
À toute étape d'un projet ou sur un ouvrage existant	Diagnostic	Diagnostic géotechnique (G5)		Influence d'un élément géotechnique spécifique sur le projet ou sur l'ouvrage existant	Influence de cet élément géotechnique sur les risques géotechniques identifiés	Fonction de l'élément géotechnique étudié

HYDROGÉOTECHNIQUE



RÉFÉRENCE : C.22.50.009
INDICE : A

PAGE 14



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemain

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 9

Tél. : 04 91 17 74 77

www.brgm.fr



Géosciences pour une Terre durable

brgm