

Document à accès
différé

Mise à jour des aléas affaissement et effondrement sur la commune de Farebersviller (Moselle – 57)

Rapport final

BRGM/RP-69259-FR

Octobre 2019



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Mise à jour des aléas affaissement et effondrement sur la commune de Farebersviller (Moselle – 57)

Rapport final

BRGM/RP-69259-FR

Octobre 2019

Étude réalisée dans le cadre des opérations
de Service public du BRGM 2019-AP17NCY006

J. LE GOFF

Avec la participation de F. Mathieu et A. Bitri

Vérificateur :

Nom : Edouard Equilbey

Fonction : Ingénieur risques naturels

Date : le 26/09/2019

Signature :



Approbateur :

Nom : Dominique Midot

Fonction : Directeur régional Grand
Est

Date : 07/10/2019

Signature :



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

Contact : qualite@brgm.fr



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Avertissement

Le tirage initial de ce rapport, en nombre fixé par convention, est diffusé à son commanditaire. Sa communicabilité ultérieure à des tiers est liée à la prise d'une décision administrative formelle à laquelle il concourt, conformément à la loi n° 78-753 du 17 Juillet 1978. Passé 01/10/2021, ce rapport devient communicable à tout tiers extérieur qui en ferait la demande ; le BRGM ne peut plus être tenu comme responsable de l'usage qui pourrait en être fait et des éventuelles conséquences pouvant en résulter.

Mots-clés : affaissement, effondrement, dissolution, aléa, gypse, sel, Farébersviller, Moselle, Grand Est

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

LE GOFF J. (2019) – Mise à jour des aléas affaissement et effondrement sur la commune de Farébersviller (Moselle – 57). Rapport final. BRGM/RP-69259-FR, 113 p., 44 ill., 8 ann.

Synthèse

La commune de Farébersviller est le siège de mouvements de terrain connus depuis le début du 20^{ème} siècle. Elle a fait l'objet de cinq arrêtés de catastrophe naturelle, couvrant les périodes 1987-1992, 1993-1996, 2004 – 2007 2012-2013 et plus récemment 2015-2016. Un Plan de Prévention des Risques Naturels (PPRN) mouvements de terrain a été prescrit puis approuvé le 13 mai 2004. Les phénomènes identifiés concernaient :

- aléa affaissement lié à des dissolutions profondes : dissolution d'une couche de sel ;
- aléa « affaissement¹ » lié à des dissolutions proches de la surface : dissolution de gypse/anhydrite présents dans les couches rouges et grises du Muschelkalk ;
- aléa glissements de terrain.

L'apparition de désordres en dehors des zones d'aléas identifiées précédemment, objet du 4^{ème} et du 5^{ème} arrêté, suggère que les phénomènes s'étendent et/ou migrent.

Un programme de travail, visant à caractériser le phénomène d'affaissement a été réalisé dans le cadre d'une convention de recherche et de développement partagés établie entre le BRGM et la DDT de la Moselle en 2015 et 2016. Ce programme s'est traduit par une étude bibliographique de la commune et par la réalisation de mesures d'interférométrie radar satellitaire conventionnelle et sur réflecteurs permanents pour déterminer l'extension en surface de la cuvette d'affaissement et la cinétique des mouvements de terrain (Rapport BRGM RP-67054-FR).

Les mesures réalisées ont permis de circonscrire et de quantifier les affaissements. La dépression topographique relevée par interférométrie radar sur les dix dernières années montre une extension kilométrique (1700 m environ) orientée NE-SW, de part et d'autre de la voie de chemin de fer. Les vitesses de déplacements atteignent 8 cm/an entre 2006 et 2010 à proximité de la voie ferrée (à l'est du lotissement des Rosiers et à proximité de l'ancienne station d'épuration). Les déformations enregistrées entre 2015 et 2016 montrent que le phénomène n'est pas stabilisé.

Ce phénomène d'affaissement est provoqué par dissolution d'évaporites (reconnaissance de sel, gypse et anhydrite) au sein du Muschelkalk moyen ;

- le sel est identifié sur deux forages, entre 108 et 123 m de profondeur d'une puissance de 4 à 7 m environ ;
- le gypse et l'anhydrite ont été identifiés sur plusieurs forages, dont ceux de 2001-2007, montrant une puissance variable de 4 à 8 m environ.

¹ Le terme d'affaissement utilisé pour les dissolutions à faible profondeur se rapporte plutôt à de l'effondrement localisé

Les travaux complémentaires proposés dans le cadre de ce programme (mesures géophysiques électriques et éventuellement réalisation de sondages) ont pour objectif de compléter le modèle géologique jusqu'à 150 m de profondeur, et en particulier de positionner la couche de sel, de détecter les secteurs en dissolution dans la couche de sel, et de cartographier l'extension du panache salé au droit des profils géophysiques. En fonction des données acquises, une modification du zonage de l'aléa mouvement de terrain sur l'ensemble ou sur une partie de la commune pourra être envisagée.

Suite aux résultats de l'étude de l'interférométrie radar et aux données compilées au cours de la phase 1 (2015-2016) pour améliorer la connaissance de la géologie du sous-sol, le BRGM a réalisé des tomographies 2D de résistivité électrique le long de profils :

- recoupant les zones d'affaissement ;
- en dehors des zones d'affaissement afin de mesurer des coupes sans anomalie et pouvoir comparer aux coupes sur des secteurs anomaux ;
- passant à proximité de forages.

La résistivité électrique est un paramètre géophysique caractérisant la capacité d'un matériau à conduire du courant électrique. Les matériaux composés de sel anhydre sont très résistants (résistivité de plusieurs dizaines de milliers d'ohm.m), alors que les terrains drainés par un panache salé résultant de la dissolution de la couche de sel seront conducteurs (résistivité vraisemblablement inférieure à 10 ohm.m).

A l'issue des investigations géophysiques, le modèle géologique a pu être grandement affiné (notamment pour la géométrie des formations salines). La présence des dépôts d'évaporites est avérée et relativement bien quantifiée.

Bien que l'infiltration d'eau douce en profondeur soit fortement suspectée comme le moteur de la dissolution, aucune analyse n'a encore permis de déterminer son rôle. Enfin à l'heure actuelle aucun exutoire à la nappe salée n'a été identifié et le gradient hydraulique/densité n'est pas caractérisé. Par conséquent, actuellement le fonctionnement hydrogéologique connu est peu contraint et présente de nombreuses incertitudes (gradient hydraulique/densité, échange avec la nappe superficielle, quantification de l'infiltration, connexion entre les structures faillées, perméabilité des failles, exutoire, etc...). Les données actuelles ne permettent pas de quantifier l'évolution future de la dissolution sur la commune. Cependant un certain nombre d'éléments permet d'appréhender qualitativement cette évolution.

Sur la base de ce modèle géologique réactualisé, il est proposé une nouvelle cartographie des aléas liés aux dissolutions (aléa affaissement et aléa effondrement localisé). Cette nouvelle cartographie s'appuie sur une nouvelle matrice élaborée en grande partie sur la commune d'Hilsprich et adaptée à la commune de Farébersviller. Cette matrice s'appuie notamment sur la profondeur des évaporites, l'évolution des dissolutions et les structures tectoniques identifiées du secteur.

Le territoire de la commune de Farébersviller a été investigué par géophysique sur 3,27 km² soit 47 % de la surface communale.

Sommaire

1. Généralités.....	9
1.1. RAPPEL DES PHENOMENES	9
1.2. CONTEXTE GEOLOGIQUE	9
1.3. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE.....	12
1.4. INTERFEROMETRIE RADAR	14
2. Investigations geophysiques	15
2.1. PROGRAMME D'INVESTIGATION	15
2.1.1. Électrique.....	15
2.1.2. Sismique.....	16
2.1.3. Synthèse.....	16
2.2. INTERPRETATION DES DONNEES	18
2.2.1. Lithostratigraphie	18
2.2.2. Interprétation du profil de sismique réflexion haute-résolution SHR1	23
2.3. INTERPRETATION STRUCTURALE.....	24
2.3.1. Limite de l'interprétation.....	24
2.3.2. Schéma structural.....	25
2.3.3. Cartographie du mur des couches grises supérieures	27
2.4. SYNTHESE DES CONNAISSANCES.....	29
2.4.1. Dissolution	29
2.4.2. Résultat cartographique.....	31
3. Mise à jour des aléas liés aux dissolution des évaporites	35
3.1. GRILLE DE DEFINITION DE L'ALEA	35
3.2. ESTIMATION DE L'INTENSITE	35
3.2.1. Estimation de la mise en pente	36
3.2.2. Estimation du diamètre de l'effondrement	36
3.3. ESTIMATION DE LA PROBABILITE D'APPARITION	37
3.3.1. Epaisseur de la couverture	37
3.3.2. Volume de vide	38
3.3.3. Evolution du front de dissolution	39
3.3.4. Influence des failles/fractures.....	41
3.4. CARTOGRAPHIE DE L'ALEA AFFAISSEMENT.....	41

3.4.1. Facteurs aggravants	42
3.4.2. Synthèse.....	43
3.5. CARTOGRAPHIE DE L’ALEA EFFONDREMENT LOCALISE	44
3.5.1. Pour les formations du Muschelkalk.....	45
3.5.2. Pour les formations du Keuper.....	47
3.6. LIMITE DES CARTES ET ECHELLE DE RESTITUTION.....	48
3.7. EVALUATION DU RISQUE.....	48
4. Conclusions et recommandations	51
4.1. SYNTHESE	51
4.2. RECOMMANDATIONS.....	52
5. Bibliographie	55

Liste des figures

Illustration 1 – Cartographie géologique harmonisée sur la commune de Farébersviller issue de la carte géologique du BRGM au 1/50 000 (fond scan 25)	10
Illustration 2 – Synthèse des couches géologiques concernées	11
Illustration 3 – Corrélation entre les forages	12
Illustration 4 – Position des nappes du Muschelkalk et des GTi depuis 1901	13
Illustration 5 – Forme de la cuvette d’affaissement identifiée par interférométrie radar satellitaire (fond orthophoto).....	14
Illustration 6 – Caractéristiques des tomographies de résistivité	16
Illustration 7 - Localisation des travaux géophysiques réalisés en 2018 et 2019	17
Illustration 8 – Synthèse des données interprétées en géophysique.....	19
Illustration 9 – Stade d’évolution des dissolutions sur la commune de Farebersvillers	22
Illustration 10 - Clé d’interprétation des coupes géo-électriques sur la base de la litho-stratigraphie	23
Illustration 11 - Profil de sismique réflexion haute-résolution (SHR1) interprété en termes de structure ..	24
Illustration 12 - Proposition de schéma structural sur fond de carte géologique à 1/ 50 000.	26
Illustration 13 - Carte des isohypses du mur des couches grises supérieures (t4b-sup.) – les zones A et B correspondent à un approfondissement du mur des couches grises supérieures lié à la dissolution du sel dans les couches grises inférieures.....	28
Illustration 14 – Log interprété de Puttelage-aux-Lacs (source : Geisler-Cussey, 1986)	30
Illustration 15 - Carte de synthèse des résultats.	33
Illustration 16 – Grille de l’aléa mouvement de terrain (Guide INERIS-CEREMA 17-164710-03375A)	35
Illustration 17 – Classes d’intensité retenues pour les phénomènes de mouvement de terrain de type affaissement ou effondrement localisé (Guide INERIS-CEREMA 17-164710-03375A) ...	36

Illustration 18 – Qualification de l'intensité selon le diamètre et la profondeur du cratère (Josien JP, 2006)	37
Illustration 19 – Arrêt de la dissolution en présence d'eau saturée (Guide INERIS-CEREMA 17-164710-03375A)	39
Illustration 20 – Répartition des déplacements annuels verticaux maximum mesurés en fonction du temps	40
Illustration 21 - Matrice d'évaluation de la prédisposition au phénomène d'affaissement sur la commune de Farebersviller	42
Illustration 22 – Cartographie de l'aléa affaissement sur la commune de Farebersviller	44
Illustration 23 – Qualification initiale de la prédisposition (Guide INERIS-CEREMA 17-164710-03375A)	45
Illustration 24 – Carte de l'aléa effondrement localisé	46
Illustration 25 – Carte de susceptibilité à l'apparition d'un effondrement localisé dans les formations du Keuper	47
Illustration 26 – Carte de répartition des bâtiments sur la commune de Farebersviller (orthophotographie de l'IGN + ajout du centre commercial avec Google Earth)	49
Illustration 27 – Identification du nombre de bâtiments concerné par les aléas liés aux dissolutions	50
Illustration 28 – Forages sur la commune de Farebersviller	67
Illustration 29 – Localisation des forages sur la commune de Farébersviller – les forages entourés en rouge correspondent aux forages de FONDASOL en 2000 ayant recoupé la couche de sel (forages 14 et 15)	68
Illustration 30 – Exemple de sequence de traitement	78
Illustration 31 – Légende des sondages sur les coupes de résistivité	91
Illustration 32 - ERT1 – Coupes de résistivité inversée interprétées en termes de géologie et de stade de dissolution	92
Illustration 33 - ERT2 – Coupes de résistivité inversée interprétées en termes de géologie et de stade de dissolution.	93
Illustration 34 - ERT3 – Coupes de résistivité inversée interprétées en termes de géologie et de stade de dissolution	94
Illustration 35 - ERT4 – Coupes de résistivité inversée interprétées en termes de géologie et de stade de dissolution	95
Illustration 36 - ERT5 – Coupes de résistivité inversée interprétées en termes de géologie et de stade de dissolution	96
Illustration 37 - ERT6 – Coupes de résistivité inversée interprétées en termes de géologie et de stade de dissolution.	97
Illustration 38 - ERT7 – Coupes de résistivité inversée interprétées en termes de géologie et de stade de dissolution	98
Illustration 39 - ERT8 – Coupes de résistivité inversée interprétées en termes de géologie et de stade de dissolution.	99
Illustration 40 - ERT9 – Coupes de résistivité inversée interprétées en termes de géologie et de stade de dissolution	100
Illustration 41 - ERT10 – Coupes de résistivité inversée interprétées en termes de géologie et de stade de dissolution.	101
Illustration 42 - ERT11 – Coupes de résistivité inversée interprétées en termes de géologie et de stade de dissolution	102

Illustration 43 - ERT12 – Coupes de résistivité inversée interprétées en termes de géologie et de stade de dissolution	103
Illustration 44 - ERT13 – Coupes de résistivité inversée interprétées en termes de géologie et de stade de dissolution	104

Liste des annexes

Annexe 1 : Glossaire/Terminologie/Sigles	57
Annexe 2 : Forages sur la commune de Farebersviller	65
Annexe 3 : Données de géophysiques électriques	69
Annexe 4 : Données de géophysiques sismiques	75
Annexe 5 : Paramètres d'inversion pour Res2DInv	79
Annexe 6 : Présentation des coupes de résistivité inversées	89
Annexe 7 : Carte de l'aléa affaissement au 1/5 000 ^{ème} (hors texte).....	105
Annexe 8 : Carte de l'aléa effondrement localisé au 1/5 000 ^{ème} (hors texte).....	113

1. Généralités

Les paragraphes ci-dessous donnent les grandes lignes du contexte de l'étude. Il est un résumé du rapport BRGM/RP-67054-FR.

1.1. RAPPEL DES PHENOMENES

Sur la commune de Farébersviller, les phénomènes d'affaissement et d'effondrement s'expliquent par la dissolution naturelle en profondeur d'une couche ou de plusieurs couches d'évaporites (sel gemme et gypse). Les dissolutions entraînent un transfert de matière entre les masses d'eau non saturée et la nappe salée permettant de créer un vide. La dissolution de la couche de sel gemme est possible en raison d'un mouvement de masse d'eaux non saturées en saumure (circuit hydrogéologique) conditionné par un différentiel des charges hydrauliques entre deux aquifères étagées distincts

Les mouvements de terrain observés sur la commune de Farébersviller sont caractérisés :

- par le développement en surface de dépressions topographiques en forme de cuvette à grand rayon de courbure. Ces phénomènes d'affaissement sont provoqués par des dissolutions profondes d'une couche de sel associée à des lentilles de gypse ;
- par l'apparition soudaine de cratère en surface d'ordre métrique. Ce phénomène d'effondrement est provoqué par des dissolutions évaporitiques proches de la surface.

Ces phénomènes entraînent de nombreuses déformations. Sur la commune de Farébersviller, l'appréciation de l'importance des dommages est très variable allant des dommages très légers à très sévères, jusqu'à la ruine partielle ou totale du bâtiment.

1.2. CONTEXTE GEOLOGIQUE

La commune de Farébersviller est composée des terrains sédimentaires du Trias supérieur (Keuper) et du Trias moyen (Muschelkalk) sur lesquels se sont déposés des formations superficielles (Illustration 1).

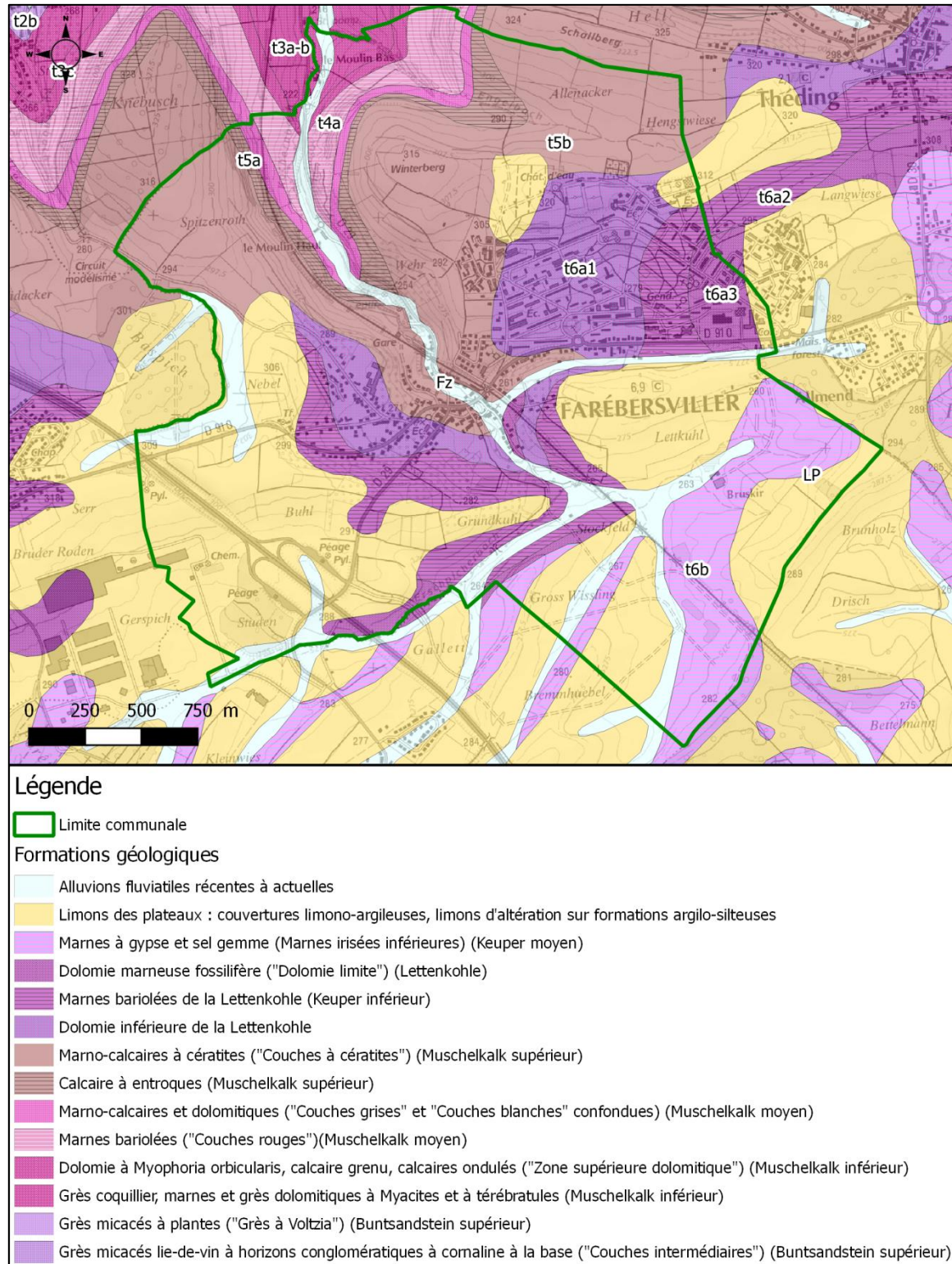


Illustration 1 – Cartographie géologique harmonisée sur la commune de Farébersviller issue de la carte géologique du BRGM au 1/50 000 (fond scan 25)

Les couches comportant des roches solubles à l'origine des déformations sont celles du Muschelkalk moyen (noté t4). Ces niveaux évaporitiques sont donc susceptibles de subir des dissolutions. Ils sont présents en fond de vallée et sur la partie inférieure des versants de la vallée du Kochernbach. On distingue (Illustration 2) :

- les marnes bariolées ou couches rouges (t4a) ;
- les couches grises (t4b) qui forment un complexe de marnes et de dolomies avec, à différents niveaux mais principalement à la base, des amas lenticulaires de gypse et d'anhydrite pouvant dépasser localement 3 m d'épaisseur. Dans le nord de la Lorraine, la partie inférieure des couches grises comprend des niveaux salifères importants.

Id étage	Etages	Profondeur (m)	Epaisseur (m)	Id stratigraphie	Stratigraphie	Lithologie
	Quaternaire	6	6	Fz	Alluvions récentes	Alluvions
t7	Keuper moyen	31	25	t7bg	Grès à roseaux	Grès argileux gris-vert
	Keuper inférieur	243	212	t7a	Marnes irisées inférieures	Marnes grises et rouges avec anhydrite et sel massif
t6	Lettenkohle	274	31	T6c	Dolomie limite	Dolomie grise argilo gréseuse
				T6b	Marnes bariolées	Marnes dolomitiques avec des lits calcaires
				T6a	Dolomie inférieure	Dolomie
t5	Muschelkalk supérieur	332	58	T5b	Calcaire à térébratules	Alternance de calcaire et marnes grise
				T5b	Couches à cératites	Alternance de calcaire et de marnes grise
		341	9	T5a	Calcaire à entroques	Calcaire beige
T4	Muschelkalk moyen	347	6	T4b	Couches blanches	Marnes grise et calcaire blanc
		403	56	T4b	Couches grises	Marnes dolomitiques grises, amas de gypse et d'anhydrite, présence de sel
		427	24	T4a	Couches rouges	Marnes rouge compactes avec gypse fibreux
t3	Muschelkalk inférieur	471	44	T3c	Zone supérieure	Dolomie
				T3b	Zone moyenne argileuse	Marnes sableuses grises à rougeâtre
				T3a	Grès coquillier	Grès
t2	Buntsandstein supérieur	482	11	T2b	Grès à Voltzia	Grès fin gris-vert à ciment argileux rouge
		516	64	T2a	Couches intermédiaires	Grès grossier argileux rouge

Illustration 2 – Synthèse des couches géologiques concernées

Sur la commune, le BRGM a connaissance de 44 forages réalisés entre 1901 et 2007 (annexe 2). Un essai de corrélation a été réalisé entre les forages (Illustration 3). Il convient de noter pour l'interprétation que le forage de 1901 et le forage S2 de 2001 sont situés à 10 m de distance et qu'ils présentent pourtant des différences importantes.

En mètres NGF	Forage de 1991 (m NGF)		Forage de 2001-2004 (m NGF)				Forage de 2000 (m NGF)		Forage 1901 réinterprété (m NGF)
	Rosiers	Zola	SP11	SP20	SP24	SP25	S1	S2	C7653
Altitude z (m)	293	295 Valeur estimée ²	234.9	234.9	234.7	234.7	307	257	257
Toit du Muschelkalk moyen	228 – 223	240 – 235	-	-	-	-	243	184.9	190
Anhydrite / gypse	-	-	212 à 205	213 à 207	207 à 203	212 à 205	231 à 160	172 à 117	160 - 165
vide	207 (perte)	-	217 à 212	214 à 213	210 à 207	216 à 212	-	142 à 141	-
Couche de sel	-	-	-	-	-	-	198.5 à 194	133.8 à 126.7	-
Eau salée (sel ou eau saumâtre)	-	-	-	-	-	-	-	-	105,7 (en 1911)
Arrêt forage	193		204.9	202.9	202.7	204.7	157	111	-

Illustration 3 – Corrélation entre les forages

1.3. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE

Deux nappes sont identifiées (Illustration 4) :

- la nappe des formations du Muschelkalk, peu profonde et affleurante, alimentant de nombreuses sources dans le secteur. Le niveau piézométrique de cette nappe est situé entre 228 m NGF et 237 m NGF (en moyenne vers 234 m NGF) selon les données issues des forages de 2000 à 2007 ;
- la nappe des Grès du Trias inférieur (GTi), plus profonde, sous couverture sur l'ensemble de la commune. L'état piézométrique de la nappe des Grès du Trias inférieur est soumis à de nombreuses influences. Les exhaures minières ont engendré une baisse importante de la nappe mais depuis leurs arrêts en 2006 (en France), la nappe remonte lentement dans ce secteur. Les mesures piézométriques des captages de Farébersviller sont datées de 1966 à 1997 et montrent un niveau piézométrique situé à une profondeur variant entre de 61 m et 68 m. Aucune mesure n'est disponible après ces dates. Un relevé piézométrique de 2015 (sondage 0165.4X.0054 à environ 3 km sur la commune de Betting) montre que la nappe des GTi se situe à 130 m NGF soit à 91 m de profondeur.

² La position du forage n'est pas connue avec certitude. Si on croise les coupes géologiques de 1992 avec la rue Emile Zola, on obtient sur le MNT actuel une altitude de 294 m NGF passant à proximité du point de nivellement 23 du réseau de 1992 à 2016 de Neolia qui présente une altitude de 295,7 m NGF en 1992.

Il est probable, lors du forage de 1901, que le niveau piézométrique de la nappe des GTi devait se situer entre les cotes 220 m NGF et 185 m NGF, soit entre 37 et 72 m de profondeur (Sedan O., 2003). Selon ces données, en 1901, le niveau piézométrique de la nappe du Muschelkalk se situait donc environ 8 m au-dessus du niveau piézométrique de la nappe des GTi. Dès 1978, des études sont réalisées sur la relation entre la nappe du Muschelkalk et la nappe des grès du Trias inférieur à la périphérie du bassin houiller lorrain. Ricourt en 1978 explique que la différence de niveau piézométrique entre les deux nappes montre que la drainance susceptible d'exister peut soit être ascendante, soit descendante, suivant les secteurs. La commune de Farébersviller se situe dans le prolongement nord-est de l'axe de Faulquemont/Saint-Avold dans lequel la nappe du Muschelkalk est susceptible d'alimenter la nappe des grès du Trias inférieur par drainance à travers les couches rouges (la différence de niveau piézométrique en 1978 varie de 10 à 80 m) (Ricourt, 1978) et/ou par l'intermédiaire des failles mises en évidence en géophysique (cf. chapitre 2). On peut donc conclure que dès 1901, la drainance entre la nappe du Muschelkalk et la nappe des GTi était descendante.

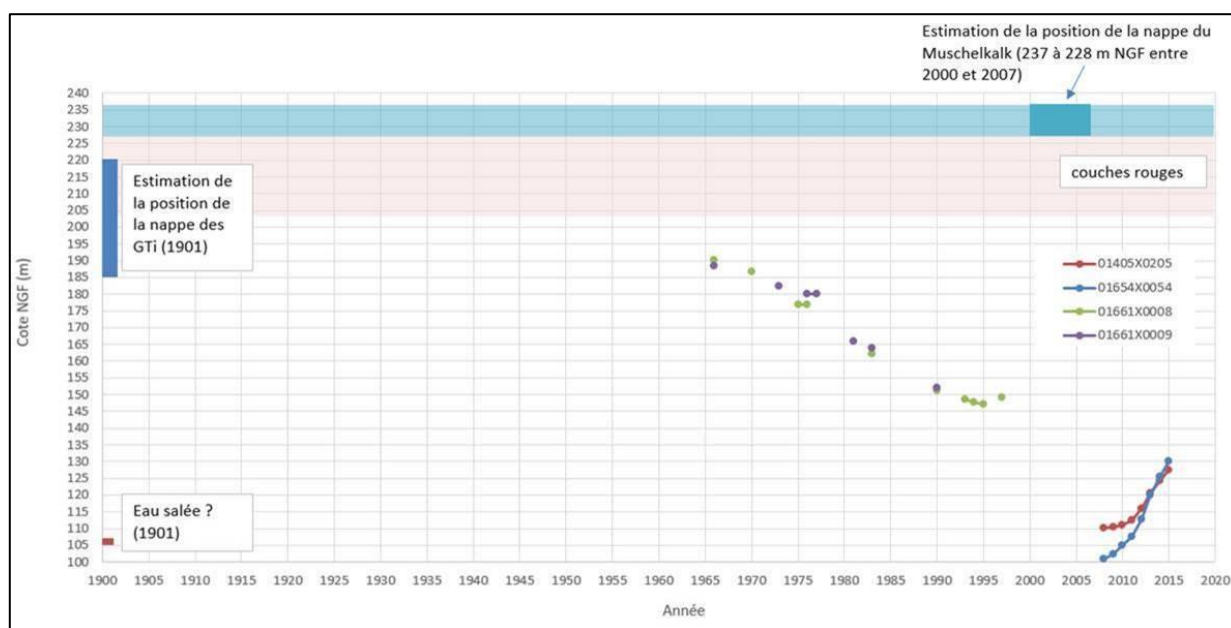


Illustration 4 – Position des nappes du Muschelkalk et des GTi depuis 1901

En 2015, les relevés piézométriques montrent que le niveau piézométrique de la nappe du Muschelkalk est d'au moins 95 m supérieur à celui de la nappe des GTi, ce qui autorise une drainance descendante dans la situation actuelle.

Dans le futur, après la lente remontée de la nappe des GTi et sa stabilisation (Rapport Geoderis E2018/034DE), le sens des échanges d'eau entre les deux nappes ne sera pas modifié puisque on retrouvera une situation proche de celle de 1901.

Le forage S2 (arrêté à 146 m de profondeur) ne permet pas de lever l'incertitude sur la présence ou non d'une nappe salée rencontrée dans le forage de 1901 à 151,3 m de profondeur. La comparaison des deux formations géologiques dans les deux forages (en comprenant les réinterprétations du service géologique allemand) amène à penser que la profondeur de 151,3 m est probablement incorrecte et ne permet de donner qu'une estimation de la position d'une possible nappe salée pérenne au début du 20^{ème} siècle (soit 105 m NGF). Une incertitude importante subsiste sur l'interprétation faite à l'époque de la présence affirmée d'une nappe salée.

1.4. INTERFEROMETRIE RADAR

Les données d'interférométrie radar ont permis de mettre en évidence une cuvette d'affaissement irrégulière d'environ 900 m de long sur 400 m de largeur allant de la rue des Rosiers à l'impasse Cocheren. Les déformations observées entre 2015 et 2016 montrent que le phénomène migre au sud du lotissement des Rosiers, au nord (au sein du lotissement Noelia) et au sud-est de ce même secteur (Illustration 5).

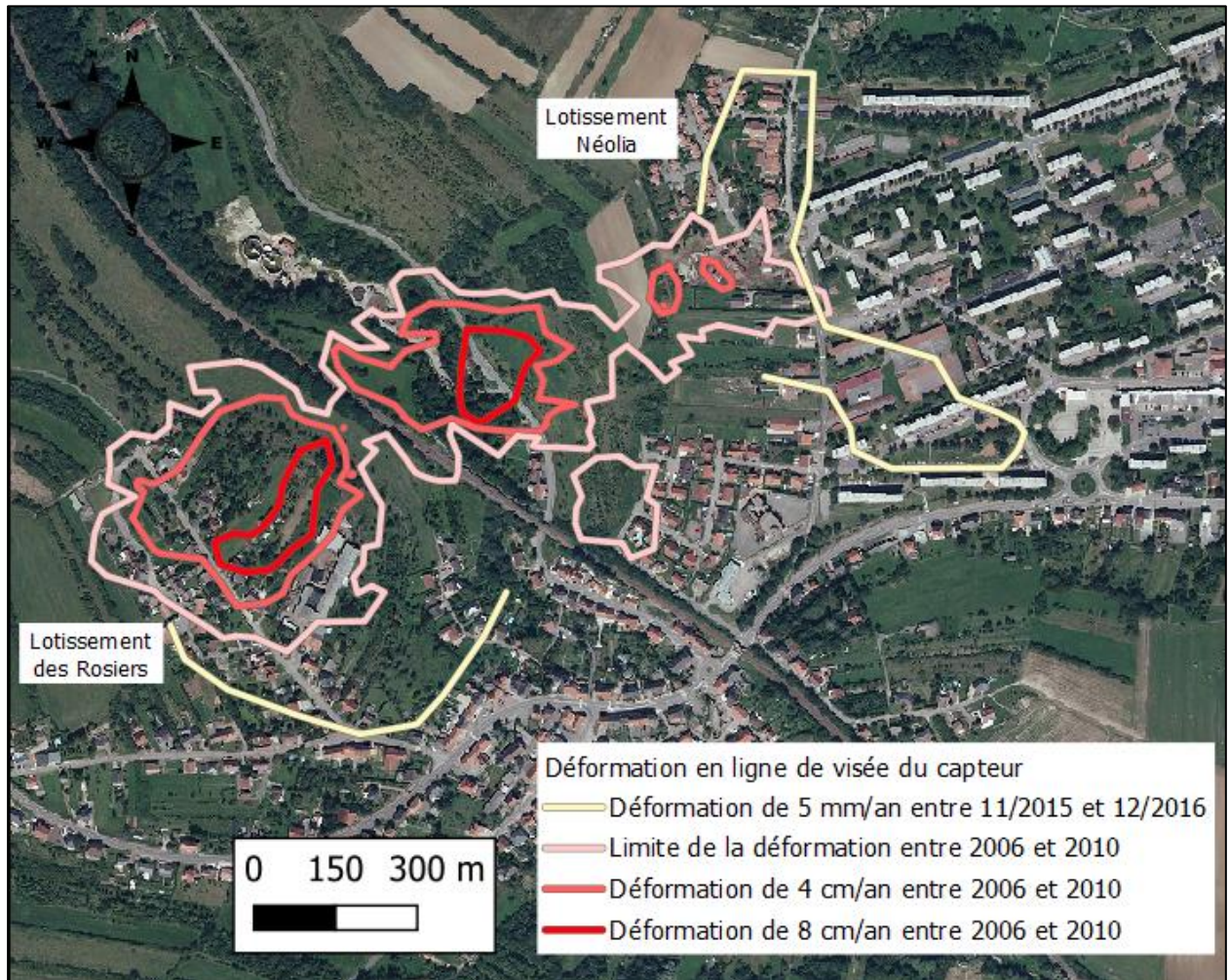


Illustration 5 – Forme de la cuvette d'affaissement identifiée par interférométrie radar satellitaire (fond orthophoto)

2. Investigations géophysiques

Les objectifs de l'étude géophysique sont les suivants :

- compléter le modèle géologique jusqu'à 150 m de profondeur, et en particulier positionner la couche de sel si elle existe ;
- détecter les secteurs en dissolution (gypse et/ou sel) dans les couches du Muschelkalk, et cartographier l'extension du panache salé au droit des profils de géophysique.

2.1. PROGRAMME D'INVESTIGATION

2.1.1. Électrique

La résistivité électrique est un paramètre géophysique caractérisant la capacité d'un matériau à conduire du courant électrique. Les matériaux composés de sel (NaCl) sont très résistants (résistivité de plusieurs dizaines de milliers d'ohm.m), alors que les terrains drainés par un panache salé seront conducteurs (résistivité vraisemblablement inférieure à 10 ohm.m).

Les profils ont été positionnées pour prendre en compte :

- les zones en mouvement (affaissement/effondrement) présents ou passés et leurs évolutions ;
- en dehors des zones en mouvement afin d'avoir un élément de comparaison en référence ;
- certains profils seront réalisés à proximité de forages géologiques afin de calibrer les réponses géophysiques avec la réalité géologique ;
- contraintes de matériels avec des dispositifs de 96 électrodes espacées de 10 m, soit un dispositif total de 950 m³ ;
- pour la réalisation de profils parallèles espacés d'une distance de l'ordre de grandeur de la profondeur d'investigation ;
- des contraintes liées à l'environnement : les secteurs sont situés en grande partie en zone urbaine ou péri-urbaine où l'implantation de profils électriques est très délicate : les méthodes électriques sont très sensibles aux effets parasites des réseaux enterrés, du bruit électromagnétique urbain, difficulté pour déployer des câbles électriques en ville... Ces contraintes n'ont pas permis d'implanter les profils ERT de façon optimale, c'est-à-dire perpendiculairement aux discontinuités suspectées.

Compte tenu de l'extension du phénomène de dissolution et des difficultés d'intervention sur les sites à étudier, la présente étude ne permettra pas de comprendre l'ensemble des problèmes d'affaissement et/ou d'effondrement sur Farébersviller.

³ En méthode électrique, c'est l'espacement entre le dipôle émetteur et le dipôle récepteur qui contrôle la profondeur d'investigation. Dans le contexte des argilites du Trias de Farébersviller, on peut considérer que cet espacement émetteur-récepteur doit être 5 fois la profondeur d'investigation (150m) pour les configurations dipôle-dipôle et Wenner-Schlumberger qui sont recommandées. La longueur minimum d'un profil de tomographie électrique sur la commune de Farébersviller sera de 750 m.

La campagne de mesures s'est déroulée en trois phases (Illustration 6 et Illustration 7) :

- du 31/07/2017 au 10/08/2017 ;
- du 27/08/2018 au 29/08/2018 ;
- du 20/11/2018 au 22/11/2018.

Profil	Date acquisition	Orientation	Nb de dispositifs	Longueur (m)	Spacing (m)	Dispositif retenu	Nb de mesures en dispositif DD			RMS (%)	
							Réalisées	Retenues	%	ROBH	STDH
ERT1	04/08/2017	NW - SE	1	870	10	DD	2097	2014	96	3.6	5.7
ERT2	31/07/2017	NW - SE	1	930	10	DD	2319	2210	95	2.9	5
ERT3	03/08/2017	NW - SE	2	1110	10	DD + WS	2793	2592	93	7.3	10.2
ERT4	02/08/2017	S - N	1	950	10	DD	2393	2222	93	5.3	7.5
ERT5	09/08/2017	NW - SE	1	950	10	DD + WS	2393	1899	79	6.1	8.6
ERT6	07/08/2017	NW - SE	1	950	10	DD	2393	2262	95	2.5	4.4
ERT7	08/08/2017	SW - NE	1	950	10	DD	2393	2326	97	3.8	5.8
ERT8	05/08/2017	NW - SE	1	870	10	DD + WS	2097	1858	89	3.5	5.5
ERT9	01/08/2017	SW - NE	1	700	10	DD	1483	1370	92	8	11.4
ERT10	10/08/2017	NW - SE	1	630	10	DD + WS	1249	1151	92	5.2	7.6
ERT11	20/11/2018	NW - SE	1	950	10	DD	2393	1950	82	3.3	4.9
ERT12	21/11/2018	SW - NE	2	1270	10	DD + WS	3512	3391	97	8.5	13.5
ERT13	22/11/2018	SW - NE	2	1270	10	DD + WS	3537	3511	99	3.1	4.6
Total	13 profils		16	12 400							

Illustration 6 – Caractéristiques des tomographies de résistivité

2.1.2. Sismique

La sismique réflexion est une technique de mesure indirecte qui consiste à enregistrer en surface des échos issus de la propagation dans le sous-sol d'une onde sismique provoquée. Ces échos sont générés par les hétérogénéités du sous-sol (contraste d'impédance entre deux formations géologiques).

Un seul profil sismique réflexion a été réalisé (SHR1) en 2019 (illustration 7). L'acquisition du profil a été réalisée à l'aide de 168 traces régulièrement espacées de 5 mètres sur 835 m. Au total 93 points de tirs sismique ont été réalisés avec un espacement de 10 m.

2.1.3. Synthèse

La localisation des 13 profils électrique et du profil sismique est donnée ci-dessous (Illustration 7).

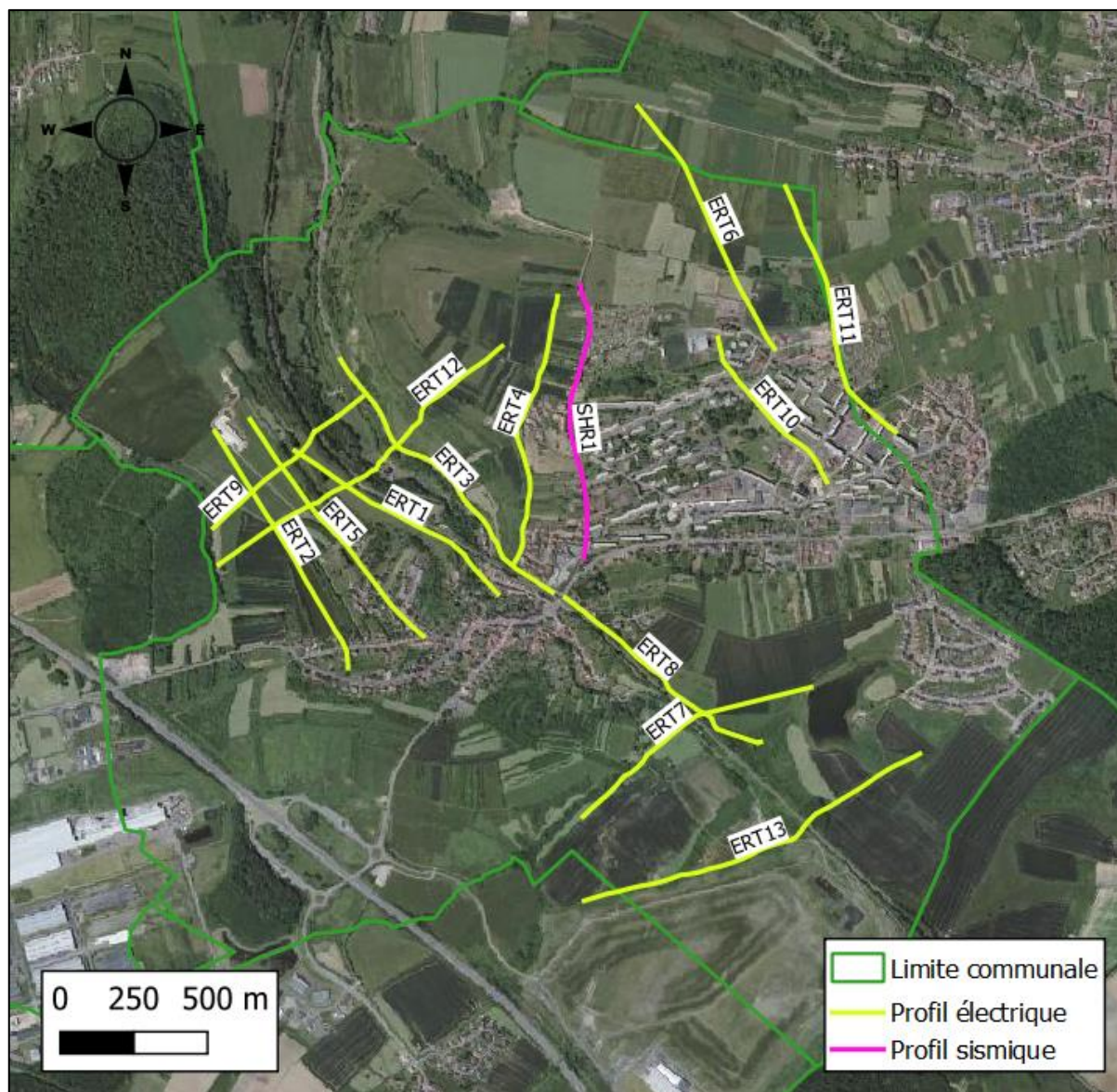


Illustration 7 - Localisation des travaux géophysiques réalisés en 2018 et 2019

2.2. INTERPRETATION DES DONNEES

2.2.1. Lithostratigraphie

L'interprétation des coupes est très compliquée car plusieurs facteurs influent sur la résistivité d'une même formation géologique. Ces facteurs sont les suivants :

- la résistivité d'une formation géologique est largement influencée par la conductivité de l'eau d'imbibition. La résistivité d'une formation sera d'autant plus faible que l'eau qu'elle contient sera minéralisée (forte conductivité). Cette règle constitue en fait l'objectif de la présente étude (détection des zones où la nappe est fortement minéralisée) et c'est pour cette raison qu'un profil électrique (ERT6) a été implanté en dehors des zones impactées par les phénomènes de dissolution afin d'attribuer à chaque formation géologique une résistivité dite « normale ». La présence des sondages carottés contribue également au calage des résistivités ;
- la résistivité d'une même couche géologique sera plus faible si cette couche est en position affleurante du fait de l'altération que si elle est située en profondeur. Cette différence est parfaitement illustrée au niveau des couches à Cératites et à Entroques :
 - sur le profil ERT6, la résistivité est comprise entre 30 et 80 ohm.m ;
 - sur le profil ERT13, la résistivité est supérieure à 150 ohm.m.
- les structures conductrices, généralement associées à des zones de faille (fracturation, altération, argilisation) avec en plus, des circulations d'eaux minéralisées (forte conductivité), lorsqu'elles sont sub-parallèles à une tomographie de résistivité ont tendance à abaisser les niveaux de résistivité de cette coupe géoélectrique. Par exemple, sur le profil ERT3, les couches situées sous l'horizon de sel ont une résistivité de l'ordre de 60 à 80 ohm.m alors qu'en principe elles sont beaucoup plus résistantes (résistivité > 200 ohm.m).

Compte tenu de ces contraintes et en s'appuyant sur les résultats des tomographies de résistivité réalisées en dehors de la zone impactée par les phénomènes de dissolution ainsi que sur les sondages profonds présents sur la zone d'étude, le calage des réponses électriques des différentes formations géologiques en présence est synthétisé en Illustration 8.

Code	Nom	Etage	Profils concernés	Regroupement unité géophysique	Résistivité	Epaisseur interprétée en géophysique	Limite interprétée en géophysique	Remarque
T7a	Base du Keuper	Keuper	ERT13	T7a	10 et 50 ohm.m			
T6c	Dolomie limite	Lettenkohle supérieur	ERT13, ERT7, ERT6 et ERT11	T6c	de 50 à 150 ohm.m	< 10		La résolution de la méthode n'est pas suffisante pour être plus précis
T6b	Marne bariolées	Lettenkohle moyen	ERT13, ERT7, ERT6, ERT11 et ETR 10	T6b	20 et 60 ohm.m	20 à 50		Caractérisées par un horizon conducteur
T6a	Dolomie inférieure	Lettenkohle inférieur	en position sub-affleurante : ERT4, ERT5 et ERT2	T6a	100 à 200 ohm.m	< 10		Rarement caractérisée (résistivité, épaisseur) du fait de sa faible épaisseur et du manque de résolution de la méthode. En position subaffleurantes : horizon résistant
T5b	Zone d'altération des calcaires à cératites	Muschelkalk supérieur		T5b T5a T4c T4b sup	30 à 60 ohm.m	Variable		Horizon conducteur mis en évidence que lorsque la formation t5b est en position sub-affleurante.
T5b et T5a	Calcaire cératites, entroques,	Muschelkalk supérieur			150 à 300 ohm.m	+/- 40		Horizon résistant
T4c	Couche blanche	Muschelkalk moyen				Formation saines : 20 à 25 Présence de dissolution du gypse : peut atteindre 50 m		Horizon conducteur
T4b sup	Partie supérieure couche grise	Muschelkalk moyen					Niveaux à gypse	
T4b inf	Partie inférieure couche grise	Muschelkalk moyen		T4b inf T4a	150 à 350 ohm.m	-	Horizon de sel	Substratum géophysique généralement très résistant
T4a	Couche rouge	Muschelkalk moyen						
T3	Grès calcaire	Muschelkalk inférieur						

Illustration 8 – Synthèse des données interprétées en géophysique

Horizon de gypse

L'interface géoélectrique entre les couches grises inférieures (substratum géophysique résistant) et les couches grises supérieures (horizon conducteur) correspond à un niveau repère de gypse fibreux blanc, situé dans la partie centrale des couches grises et dont les épaisseurs sont les suivantes :

- 0,60 m dans S14 ;
- 0,45 m dans S15 ;
- environ 1 m, en partie dissous (perte d'injection) dans S4.

Ce niveau repère est situé entre 21 m (S14, S4) et 25 m (S15) sous le toit des couches grises.

Au-dessus de ce niveau repère : présence d'un horizon conducteur correspondant à la partie supérieure des couches grises, aux calcaires à Entroques et à la partie inférieure des calcaires à Cératites. Compte tenu de la position variable du toit de cet horizon conducteur au sein des calcaires à Cératites, il est très probable que cet horizon géoélectrique corresponde en fait à l'aquifère du Muschelkalk (pas de données piézométriques précises et récentes sur la zone d'étude pour confirmer cette interprétation). La résistivité de cet horizon conducteur varie en fonction des phénomènes de dissolution affectant le gypse. Quand cette formation est située à plus d'une centaine de mètres de profondeur, elle n'est plus individualisée car le contraste de résistivité avec les formations résistantes sus-jacentes et sous-jacentes n'est pas suffisant.

L'épaisseur de l'horizon conducteur des couches blanches et de la partie supérieure des couches grises serait de l'ordre de 20 à 25 m lorsque les formations sont saines et peut atteindre une cinquantaine de mètres dans les zones affectées par les dissolutions du gypse.

L'interface entre ces deux premiers horizons géoélectriques se situe fréquemment dans la partie inférieure des calcaires à Cératites alors que cette formation est relativement homogène d'un point de vue lithologique. Le contraste de résistivité entre ces deux horizons ne peut donc s'expliquer que par une différence de conductivité des eaux d'imbibition : plus minéralisées au niveau de l'horizon conducteur et moins minéralisée au niveau de l'horizon résistant ou absence d'eau (ce qui appuierait l'hypothèse que cette interface corresponde au niveau piézométrique de la nappe du Muschelkalk).

Horizon de sel :

L'horizon de sel présent dans la partie inférieure des couches grises n'est pas mis en évidence du fait de sa faible épaisseur (5 à 7 m) et de sa profondeur. La méthode électrique ne permet pas de caractériser une couche de cette épaisseur à cette profondeur parce que le contraste de résistivité avec l'encaissant est probablement très faible⁴.

⁴ En effet, par expérience (et contrairement à ce qui est généralement annoncé dans la littérature : plusieurs dizaines de milliers d'ohm.m), la résistivité des couches de sel dans le Keuper ou le Muschelkalk lorrain est de l'ordre de 300 ohm.m (études sur les nappes salées du bassin salifère de Nancy, études sur les affaissements salins d'Hilsprich), c'est-à-dire pratiquement identique à celle du substratum géophysique.

Le toit théorique de l'horizon de sel présenté sur les coupes géoélectriques est une extrapolation qui s'appuie sur les données des sondages profonds et sur la position de l'interface géoélectrique correspondant au mur de l'horizon conducteur des couches grises supérieures : le toit du sel se situe entre 23 m (sondage S14) et 26 m (sondage S15). Une valeur de moyenne de 25 m a été retenue pour l'ensemble de la zone d'étude.

La présence d'une nappe salée au toit de l'horizon de sel est caractérisée par une anomalie conductrice (résistivité comprise entre 5 et 40 ohm.m) au sein du substratum résistant des couches grises inférieure et des couches rouges (résistivité : 300 ohm.m). Le fait que sur les coupes géoélectriques, les anomalies conductrices dues à la présence d'une nappe salée semblent s'enraciner en profondeur, est un artéfact à la fois de mesure et d'inversion. Les lignes de courant, au contact d'un important conducteur (résistivité de la saumure inférieure à 1 ohm.m) sont canalisées par celui-ci et ne passent pas en dessous.

Phase de dissolution

L'interprétation des coupes géoélectriques en termes de stade de dissolution des évaporites est exclusivement basée sur les niveaux de résistivité affichés par les couches grises supérieures pour les phénomènes de dissolution affectant le gypse et par les couches grises inférieures pour la dissolution affectant l'horizon de sel.

En l'absence de mesures de conductivité précises de l'eau de l'aquifère du Muschelkalk en différents points de la zone d'étude, les gammes de résistivité affectées aux différents stades de dissolution ne reposent que sur l'expérience acquise dans des contextes relativement similaires⁵.

L'interprétation des données géophysique en termes de dissolution permet de distinguer trois niveaux de dissolution (Illustration 9) :

Nom de la formation	Partir supérieure couche grise (t4 sup)	Partie inférieure couche grise (t4b inf.)
Formation saines	70 à 150 ohm.m	150 à 350 ohm.m
Dissolution active au niveau des amas de gypse (partie inférieure de t4b sup.)	10 à 30 ohm.m	150 à 350 ohm.m
Dissolution active au niveau des amas de gypse (partie inférieure de t4b-sup). et au niveau de l'horizon de sel (t4b inf.)	10 à 30 ohm.m	5 à 40 ohm.m
Stade où les phénomènes de dissolution du gypse (partie inférieure de t4b-sup.) semblent être terminés	50 à 100 ohm.m	150 à 350 ohm.m.

Illustration 9 – Stade d'évolution des dissolutions sur la commune de Farebersvillers

⁵ Sur Hilsprich (57) pour le sel, sur Lochwiller (67) et sur Le Luc (83) pour le gypse et l'anhydrite

Le cas particulier d'une présence de nappe salée au toit de l'horizon de sel et de l'absence de dissolution du gypse n'a pas été rencontré.

Les résistivités associées à chaque formation sont données dans l'illustration 10.

Horizon géo-électrique	Formation géologique	Résistivité (Ohm.m)				Epaisseur (m)	
		Formation saine	Dissolution du gypse	Dissolution du sel	Phase de tassement	Interprétation géophysique	Carte géologique + sondages
t7a	Base du Keuper	10 à 50				indéterminée	
t6c	Dolomie limite Lettenkohle sup.	50 à 100				< 10	3
t6b	Marnes bariolées Lettenkohle moy.	20 à 60				20 à 50	30
t6c	Dolomie inférieure Lettenkohle inf.	100 à 200				< 10	10
t5b + t5a + t4b-sup	Zone d'altération des calcaires à Cératites	30 à 60				variable	0
	Calcaires à Cératites + calcaires à Entroques	150 à 300				+/- 40	58
	Partie supérieure des Couches grises + niveaux à gypse	70 à 150	10 à 30		50 à 100	20 à 25	65 à 57
t4b-inf + t4a	Partie inférieure des Couches grises + horizon de sel	150 à 350		5 à 40		Indéterminée (substratum géophysique)	
	Couches rouges + grès calcaires du Muschelkalk inf. (t3)	150 à 350					

Illustration 10 - Clé d'interprétation des coupes géo-électriques sur la base de la litho-stratigraphie

2.2.2. Interprétation du profil de sismique réflexion haute-résolution SHR1

Le profil de sismique réflexion haute-résolution SHR1 (Illustration 11) n'a pas donné les résultats escomptés pour diverses raisons :

- les données sont de qualité médiocre à cause du bruit anthropique dû au contexte urbain et ceci malgré la fermeture de la route à la circulation le long du profil ;
- l'énergie de la source sismique (chute de poids) a été limitée afin de ne pas occasionner de dégâts au niveau de la chaussée. De ce fait la profondeur d'investigation ne dépasse pas 150 m au sud et 200 m au nord ;
- l'épaisseur de l'horizon de sel n'est pas suffisante pour constituer un réflecteur caractéristique.

Ce profil sismique a néanmoins permis de confirmer la présence des 5 failles (F1 à F5) et de préciser leur localisation. L'absence de réflecteurs caractéristiques au sein de la pile sédimentaire ne permet de caractériser ni le rejet des failles, ni le pendage des couches.

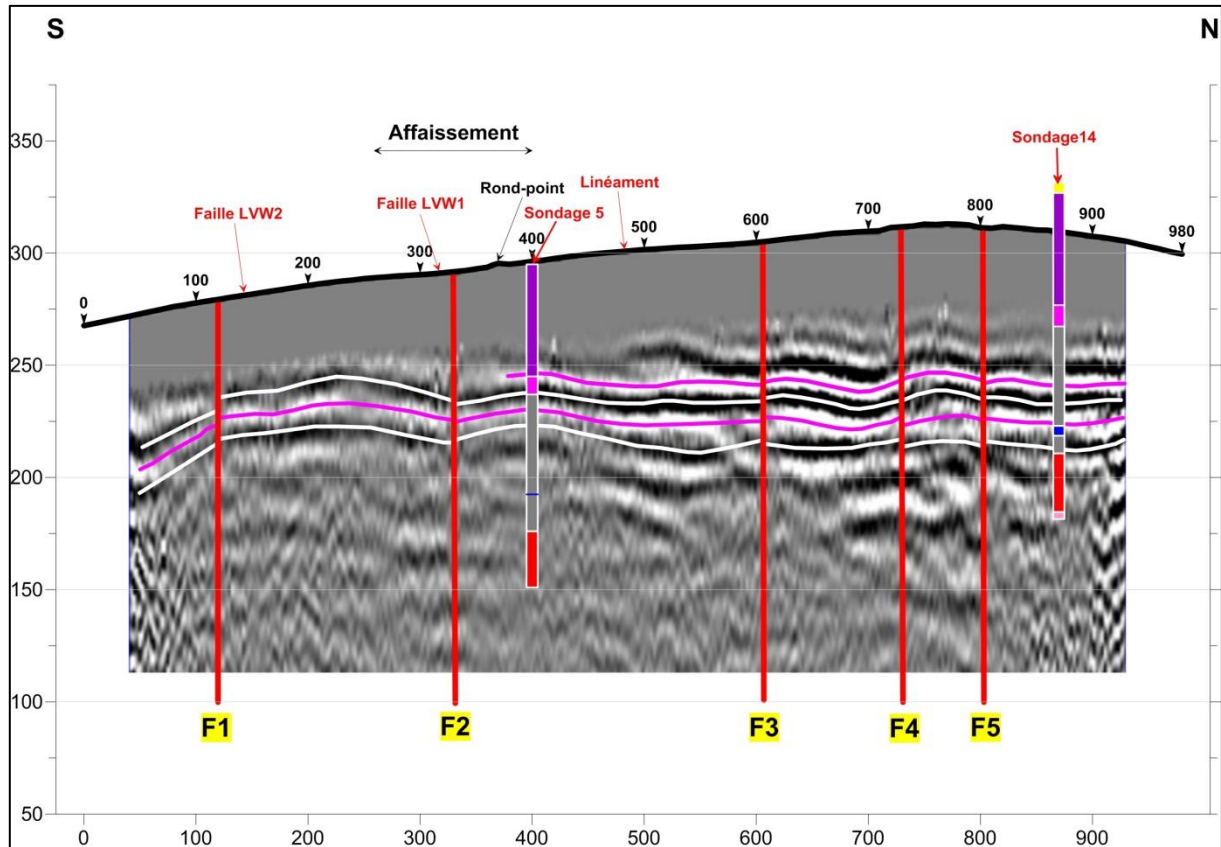


Illustration 11 - Profil de sismique réflexion haute-résolution (SHR1) interprété en termes de structure

2.3. INTERPRETATION STRUCTURALE

2.3.1. Limite de l'interprétation

L'interprétation des tomographies de résistivité en termes de structures a rencontré un certain nombre de difficultés :

- l'expression des failles au sein de formations globalement conductrices est relativement discrète. En effet, la zone de fracturation/altération qui est en principe associée à une faille et qui donne une réponse conductrice, ne peut être mise en évidence du fait d'un manque de contraste de résistivité (conducteur au sein d'un conducteur) ;
- les phénomènes de dissolution du gypse et du sel présent à plusieurs niveaux au sein de la pile sédimentaire contribuent à masquer la réponse des failles (présence d'eau très conductrice).

Compte tenu des difficultés d'interprétation évoquées précédemment et de la faible densité des profils électriques, ce schéma n'est absolument pas univoque, le nombre de failles mises en évidence n'est probablement pas exhaustif, les directions sont souvent supposées et de nombreuses incertitudes subsistent.

2.3.2. Schéma structural

Les données mettent en évidence deux systèmes de failles majeures (Illustration 12) :

Système de direction NE-SW

Ce système de failles est représenté, dans la zone située en rive droite du Kochernbach, par au moins 5 failles (F1, F2, F3, F4 et F5) subparallèles entre elles. La localisation des failles F1 et F2 est validée par les observations de Van Werveke en 1909 et la faille F3 est en partie corrélée avec le linéament issu de la photo interprétation en 2003. La présence de ces 5 failles a également été confirmée par le profil sismique. Le rejet vertical de ces failles n'est pas très important (quelques mètres, coupe ERT11). Elles provoquent l'affaissement successif (de F3 vers F1) du compartiment sud-est.

L'extension de ces failles en rive gauche du Kochernbach est relativement mal caractérisée et probablement masquée par la présence des failles du système NW-SE. On peut cependant avancer certaines correspondances comme : F1 = F16, F2 = f5b et F3 = F15.

Système de direction NW-SE

Ce système de failles est représenté par un faisceau qui emprunte la vallée du Kochernbach (failles F12 et F13 dans la partie amont, failles F6, F7B, F7 et F7A dans la partie aval). Ce faisceau de failles semble délimiter une structure effondrée dont le rejet serait d'environ 30 m et la largeur de 150 à 200 m (les caractéristiques de cette structure sont bien exprimées sur ERT7 et ERT12).

D'autres failles de direction NW-SE (F8, F9 et F10) ont été mises en évidence sur le versant et sur le plateau situé en rive gauche du Kochernbach.

Faillle supposées

L'interprétation des résultats a permis de supposer l'existence de deux autres failles :

- la faille F14 est une faille supposée qui a été tracé à partir d'indices géomorphologiques mais également pour expliquer les décrochements mis en évidence au niveau des failles F2, F3, F4 et F5 ;
- la faille F17, bien que mise en évidence sur ERT8, a également été tracé à partir d'indices géomorphologiques. Sa localisation et sa direction seront confortées par la carte des isohypses du mur des couches grises supérieures.

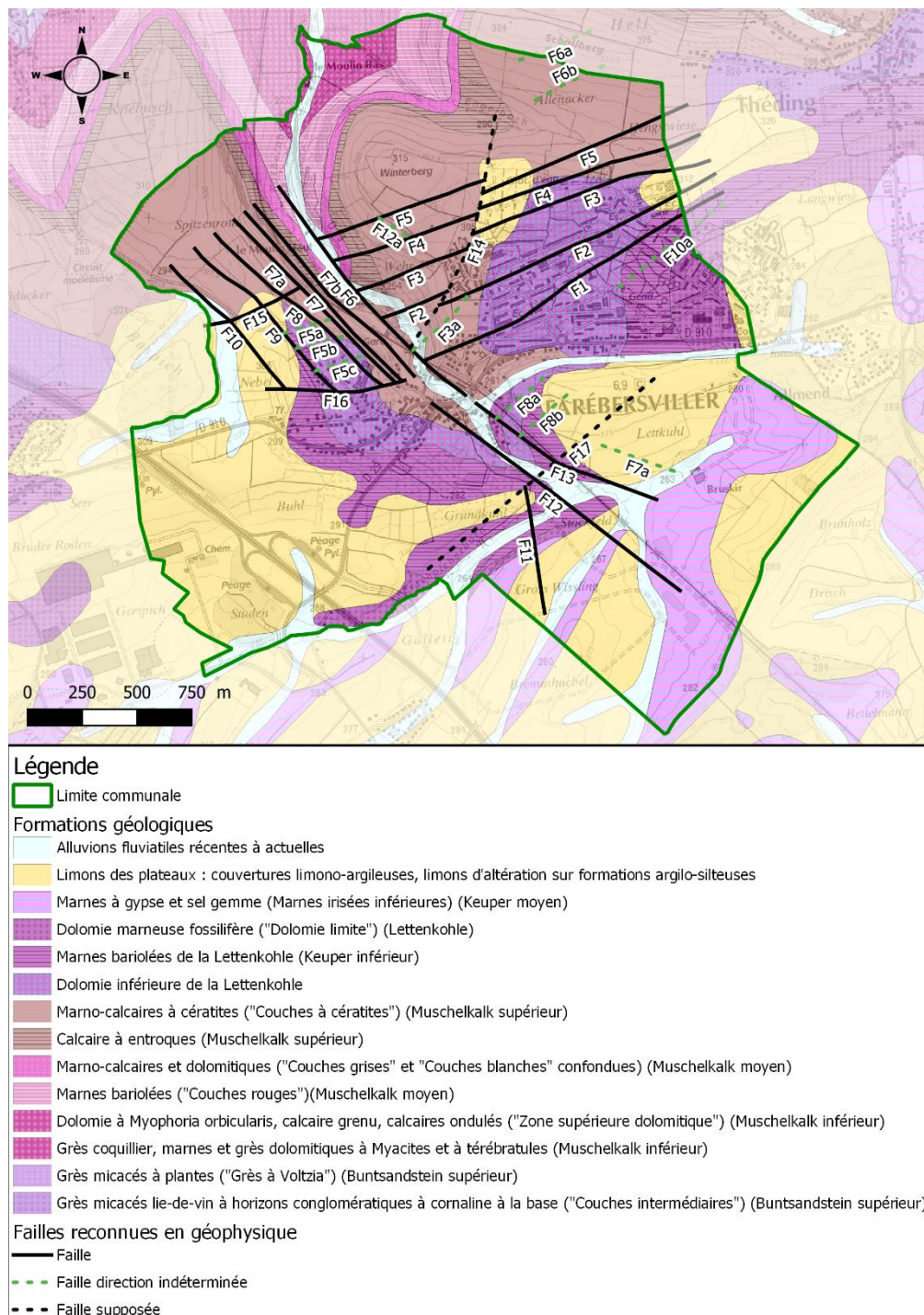


Illustration 12 - Proposition de schéma structural sur fond de carte géologique à 1/ 50 000.

2.3.3. Cartographie du mur des couches grises supérieures

Les calages et l'interprétation des tomographies de résistivité ont permis de localiser, avec plus ou moins d'incertitude, la base des couches grises supérieures qui correspondrait à un horizon de gypse massif surmontant des dolomies argileuses pauvres en gypse (puissance 11 à 14 m) et une série argileuse sans gypse (environ 11 m). Compte tenu des caractéristiques électriques de la partie supérieure des couches grises (conductrice et siège des dissolutions du gypse) et des formations sous-jacentes (résistantes et pauvres en gypses), il est très probable que l'interface géoélectrique entre ces deux formations corresponde au mur de l'aquifère du Muschelkalk. La carte des isohypses du mur des couches grises supérieures (Illustration 13) permet de tirer les conclusions suivantes :

- le pendage des couches est de l'ordre de 4° vers le sud-est en incluant le jeu des failles de direction NE-SW ;
- le fort gradient mis en évidence au niveau du profil ERT7 confirme la présence et la direction de la faille supposée F17. D'après les tomographies ERT7 et ERT8, cette faille aurait un rejet de l'ordre de 30 à 40 m et provoquerait l'effondrement du compartiment sud-est ;
- une structure effondrée de type graben est mise en évidence. Elle traverse toute la zone d'étude suivant une direction NW-SE et est en parfaite corrélation avec la vallée du Kochernbach. Dans la partie sud-est du secteur, elle semble être associée aux failles F12 et F13 alors qu'au nord-ouest, elle serait associée aux failles F6 et F7. Globalement, l'effondrement est estimé à 30 - 40 m. Au niveau du profil ERT7, qui est situé en dehors des zones impactées par les dissolutions, les caractéristiques de cette structure en graben sont un rejet de 30 m et une largeur de 200 m. L'effondrement de cette structure est d'origine tectonique mais il n'est pas exclu que le rejet ait été amplifié par les dissolutions du gypse et du sel qui depuis plus d'un siècle semblent être contrôlées par cette structure (l'affaissement du début du 20^{ième} siècle est parfaitement centré sur ce graben).

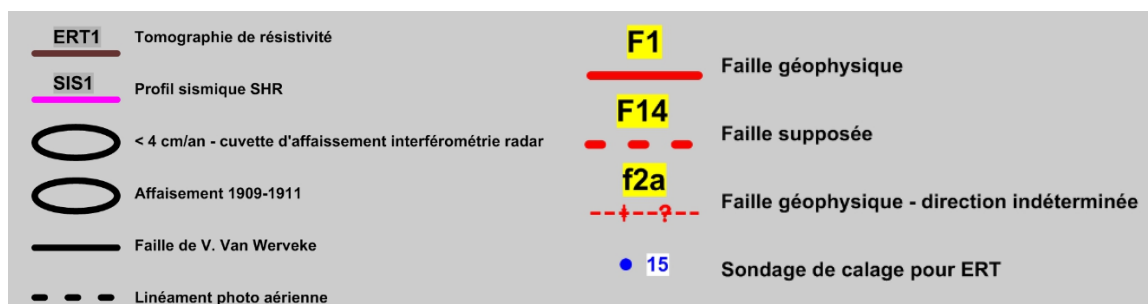
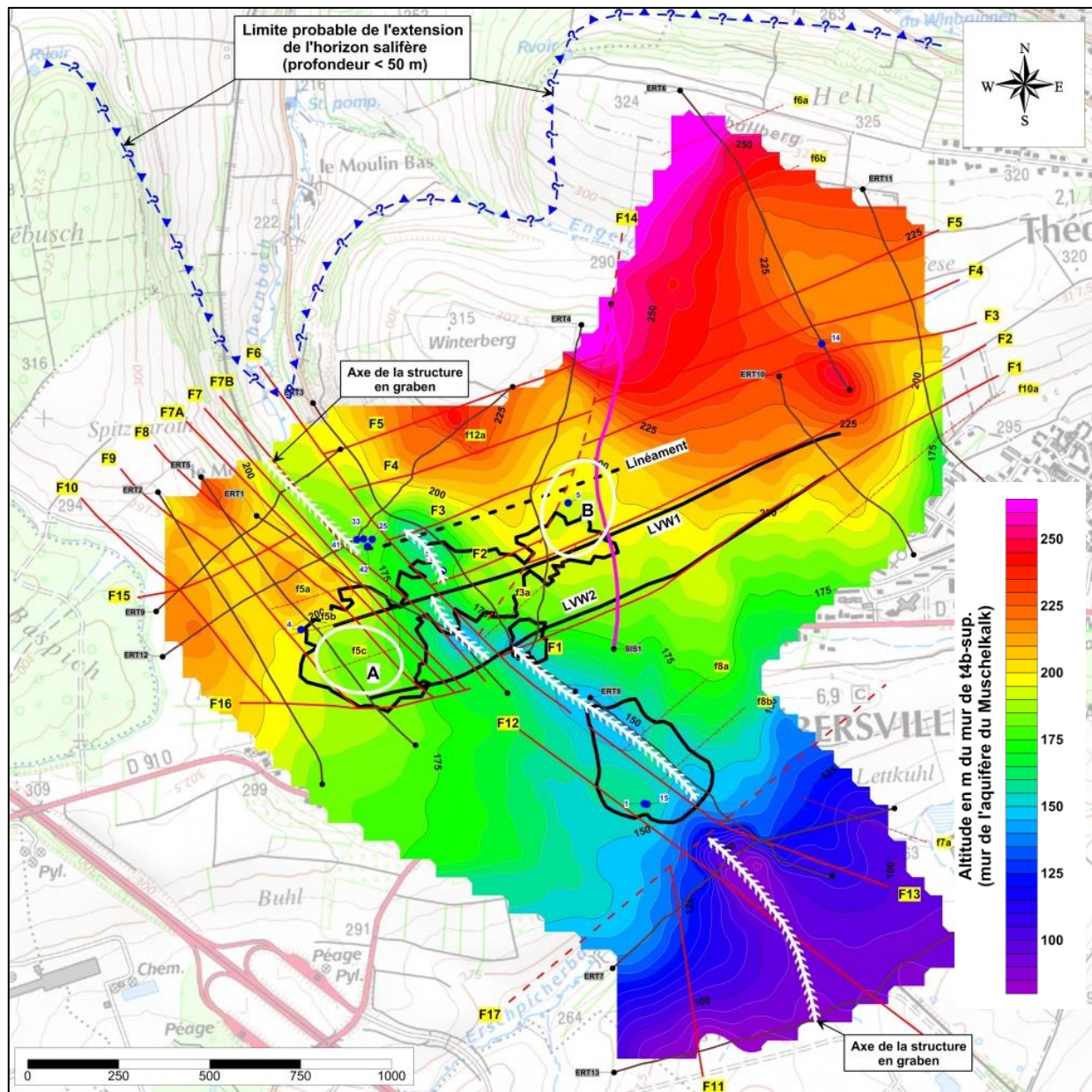


Illustration 13 - Carte des isohypses du mur des couches grises supérieures (t4b-sup.) – les zones A et B correspondent à un approfondissement du mur des couches grises supérieures lié à la dissolution du sel dans les couches grises inférieures

Evolution du phénomène

Les failles de direction NE-SW affecteraient la structure en graben qui semble être le siège et le drain préférentiel des phénomènes de dissolution (gypse et sel). Cette structuration pourrait être une explication à l'extension des phénomènes de dissolution sur les flancs de la vallée en direction du nord-est et du sud-ouest.

Les deux cuvettes mises en évidence par interférométrie radar (lotissement des Roses et lotissement FMC) sont en corrélation avec des approfondissements du mur des couches grises supérieures. Ces deux zones d'approfondissement auraient une amplitude de l'ordre de 5 à 10 m (zones A et B de l'illustration 13).

L'horizon de sel, situé dans les couches grises inférieures, n'est mis en évidence par les tomographies de résistivité que dans les secteurs où il est affecté par la dissolution (anomalies très conductrices). En dehors de ces secteurs, sa présence et sa localisation sont extrapolées.

Les experts des bassins salifères s'entendent pour affirmer qu'il est peu probable de trouver un horizon de sel dans la tranche 0 – 50 m de profondeur (le sel ayant été dissout). La limite du toit du sel a été tracée en considérant :

- le toit du sel est situé en moyenne à 50 m sous le mur des Calcaires à Entroques ;
- absence de sel à moins de 50 m de profondeur.

2.4. SYNTHÈSE DES CONNAISSANCES

2.4.1. Dissolution

Deux phénomènes distincts de dissolution des horizons évaporitiques ont été mis en évidence. Ces deux phénomènes sont les suivants :

- dissolution des amas de gypse lenticulaire située dans la partie supérieure des couches grises et plus précisément à la base de l'aquifère du Muschelkalk ;
- dissolution d'un horizon de sel de faible puissance (5 à 7 m) situé dans la partie inférieure des couches grises à environ 25 m sous le mur de l'aquifère du Muschelkalk.

Ces phénomènes de dissolution sont contrôlés par la structure des assises du secteur d'étude, à savoir :

- le pendage des couches qui est de l'ordre de 4° vers le sud-est. La progression des nappes salées se fera donc globalement vers le nord (de l'aval pendage vers l'amont pendage) ;
- les zones de fracturation associées aux failles qui constituent des entrants pour l'eau douce et des drains préférentiels pour la circulation des eaux.

Deux systèmes de failles ont été mis en évidence sur la zone d'étude :

- direction NW-SE : Ce faisceau de faille est à l'origine d'une importante structure effondrée de type graben (rejet : environ 30 m, largeur : environ 200 m). Le point de départ des phénomènes de dissolution (gypse et/ou sel) se situe dans la partie sud de cette structure effondrée au niveau de l'affaissement historique de 1909 ;
- direction NE-SW : Les intersections de ces failles avec la structure effondrée sont probablement à l'origine de la progression des panaches salés vers le nord-est et vers le sud-ouest.

L'extension de la nappe salée vers le nord en suivant la vallée du Kochernbach (structure en graben) est plus que probable. Les phénomènes de dissolution du gypse s'étendraient donc jusqu'à la zone d'affleurement du mur des couches rouges qui contiennent également des amas lenticulaires de gypse.

Dans le contexte de Farébersviller, les phénomènes liés à la dissolution des évaporites sont difficilement dissociables : présence de sel intercalé avec le gypse et l'anhydrite dans les couches grises/rouges du Muschelkalk. La précision des données géophysiques ne permet pas de lever ces incertitudes.

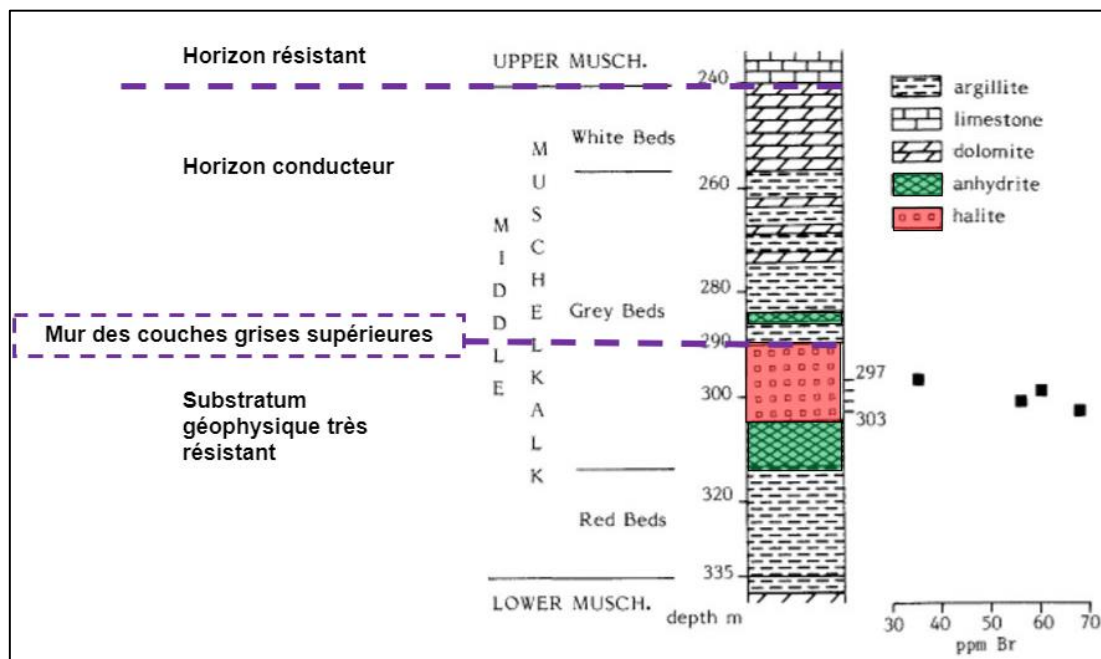


Illustration 14 – Log interprété de Putteltange-aux-Lacs (source : Geisler-Cussey, 1986)

2.4.2. Résultat cartographique

L'interprétation a permis de circonscrire 6 zones (Illustration 15) qui sont à des stades de dissolution différentes :

- **Zone 1** : Au niveau de cette zone qui est en parfaite corrélation avec la vallée du Kochernbach, les phénomènes de dissolution affectent à la fois les niveaux de gypse des couches grises supérieures et l'horizon de sel des couches grises inférieures. La progression de ces nappes salées se fait de l'aval pendage vers l'amont pendage (du sud-est vers le nord-ouest) tout en étant probablement contrôlée par la structure en graben délimitée par les failles F6 et F7 ;
- **Zone 2** : Sur cette zone, les phénomènes de dissolution affecteraient les formations gypseuses des couches grises supérieures et l'horizon de sel des couches grises inférieures. Le panache salé (gypse + sel) s'étend de la ligne de chemin de fer au sud-ouest jusqu'au-delà du profil électrique ERT10. La progression de ce panache semble être contrôlée par le pendage des couches (progression de la dissolution de l'aval pendage vers l'amont pendage) et par les principales failles de direction NE-SW (F1 et F2). Des incertitudes sur la cartographie de cette zone subsistent :
 - le profil ERT10 étant entièrement situé en zone urbaine, il n'est pas exclu que des artefacts de mesures dus aux réseaux enterrés aient perturbé l'interprétation ;
 - la distance séparant les profils ERT4 et ERT10 est d'environ 900 m ce qui constitue une lacune d'information importante notamment dans un secteur à enjeux.
- **Zone 3** : Cette zone, située sur le flanc ouest de la vallée du Kochernbach et au nord-ouest de la zone 4, ne serait affectée que par la dissolution des lentilles de gypse de t4b-sup. En fait, elle constitue l'extension vers l'amont pendage de la nappe salée des formations gypseuses qui a précédemment affecté le secteur de la rue des Rosiers (zone 4). L'extension des phénomènes de dissolution du gypse en direction du nord-ouest est donc plus que probable ;
- **Zone 4** : Au niveau de cette zone, qui est en parfaite corrélation avec une cuvette d'affaissement mise en évidence par interférométrie radar, les phénomènes de dissolution, qui d'après les tomographies de résistivité n'auraient affectés que les amas de gypse des couches grises supérieures, seraient terminés. Cette zone serait en phase d'affaissement résiduel. La carte des isohypses du mur de t4b-sup. suggère cependant, par la présence d'une cuvette d'approfondissement de ce mur une dissolution complète ou partielle de l'horizon de sel ;
- **Zone 5** : Cette zone située sur le versant nord-est de la vallée du Kochernbach a été classée en phase d'affaissement résiduel par analogie avec la zone 4. La résistivité des couches grises supérieures au niveau des profils ERT4 et ERT12 est du même ordre de grandeur que sur les parties sud-est des profils ERT5 et ERT1. La pointe sud et l'extension vers le NE de cette zone sont plus ou moins en corrélation avec les cuvettes mises en évidence par interférométrie radar. Dans le secteur du lotissement FMC, il semblerait (interprétation du profil ERT4) que les deux horizons d'évaporites (gypse et sel) aient été affectés par les phénomènes de dissolution. La limite nord-est de la zone 5 reste très imprécise car la résistivité de la formation t4b-sup. est à la limite entre phase d'affaissement résiduel et formations saines.

- **Zone 6** : Au sud de la route D910 et au niveau de l'affaissement historique 1909, les phénomènes de dissolution du gypse et du sel dans la partie inférieure du Muschelkalk moyen ne seraient plus actifs et la phase d'affaissement résiduel serait même terminée. Les profils électriques ERT7 et ERT13 montrent qu'il n'y a pas d'extension des nappes salées (gypse ou sel) vers le sud-est ;
- **Le secteur situé au sud de la départementale D910** n'a été que partiellement investigué en géophysique. Seul l'affaissement historique de 1909 (zone 6) a fait l'objet d'une reconnaissance par la tomographie ERT8. Ce secteur ne devrait à priori pas être affecté par les phénomènes de dissolution (gypse ou sel) : Ce secteur se situe en aval pendage des différents panaches salés qui affectent le nord de la zone d'étude.

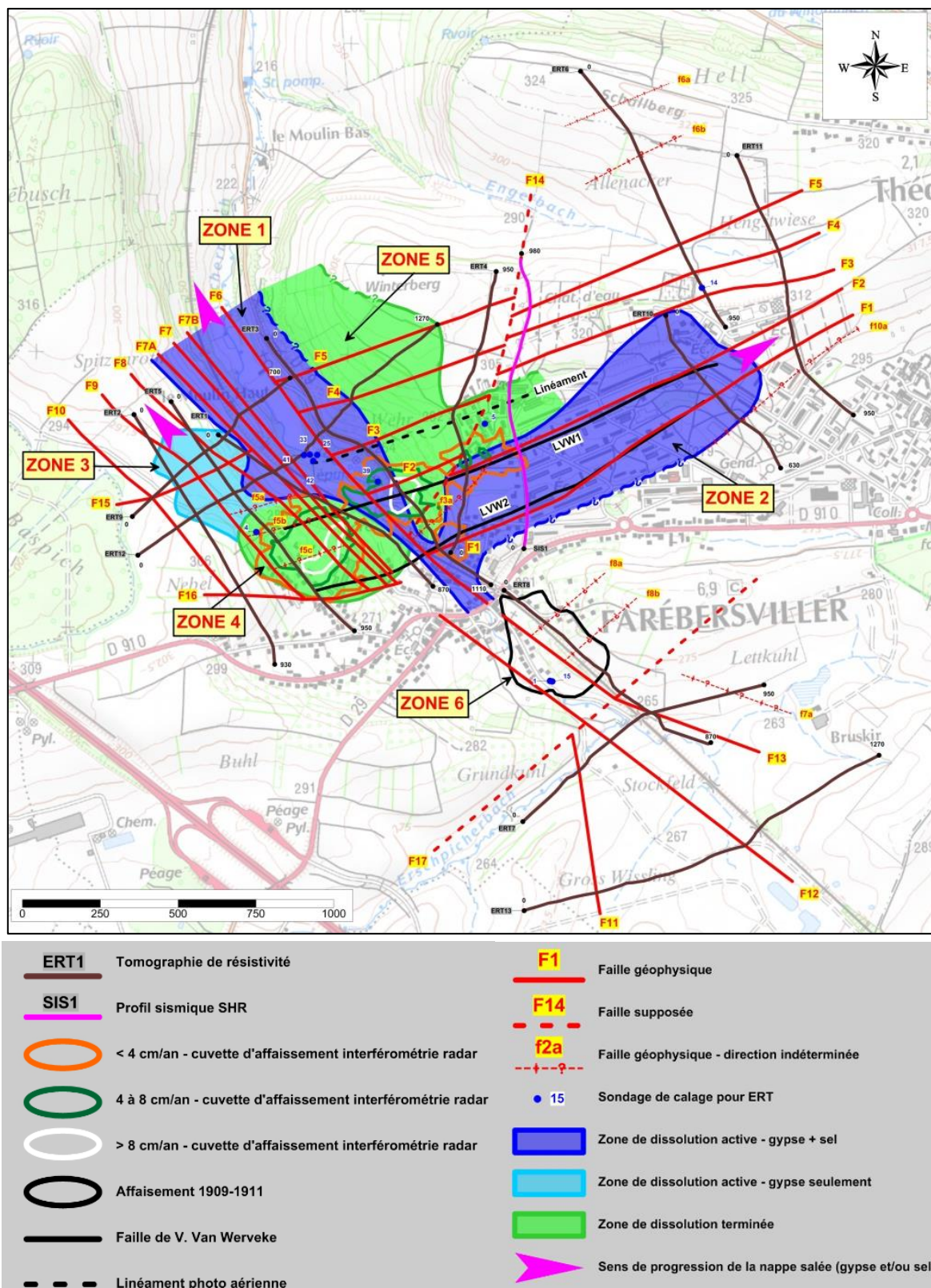


Illustration 15 - Carte de synthèse des résultats.

3. Mise à jour des aléas liés aux dissolution des évaporites

3.1. GRILLE DE DEFINITION DE L'ALEA

L'aléa est la probabilité qu'un mouvement de terrain, d'une intensité donnée, se produise au cours d'une période donnée. Par conséquent, l'évaluation de l'aléa résulte du croisement entre une intensité et une probabilité d'occurrence d'un phénomène.

Pour le prise en compte de l'aléa mouvement de terrain lié à la dissolution des évaporites, une grille de croisement classique a été retenue. Cette grille est homogène, elle ne privilégie pas l'intensité ou la prédisposition dans le croisement pour déterminer l'aléa (Illustration 16).

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

Illustration 16 – Grille de l'aléa mouvement de terrain (Guide INERIS-CEREMA 17-164710-03375A)

3.2. ESTIMATION DE L'INTENSITE

Le guide méthodologique « dissolution naturelle du gypse dans le sous-sol » définit les intensités liées à la dissolution du gypse de manière similaire aux intensités définies dans le cas des cavités souterraines (Illustration 17) :

- dans le cas des affaissements en fonction du pourcentage de mise en pente ;
- dans le cas des effondrements en fonction du diamètre de l'effondrement.

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
Modérée	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 17 – Classes d'intensité retenues pour les phénomènes de mouvement de terrain de type affaissement ou effondrement localisé (Guide INERIS-CEREMA 17-164710-03375A)

3.2.1. Estimation de la mise en pente

La mise en pente calculée sur la commune de Farébersviller est de 4,58 % en 2016 (par rapport à une mise en pente de 3,56 % en 1992) (rapport BRGM RP-66127-FR). Cette mesure est prise sur les valeurs de nivellement les plus récentes (secteur Néolia). Aucun réseau de nivellement plus global n'existe sur la commune.

Selon la classification proposée par le guide, l'intensité est qualifiée de modérée.

3.2.2. Estimation du diamètre de l'effondrement

- Dans les formations du Muschelkalk

L'effondrement historique de 1930 (dit du Trou du Diable) est un effondrement de plusieurs mètres de côté et de profondeur d'ordre métrique. Cet effondrement se serait produit dans les Calcaires à Entroques du Muschelkalk supérieur. Aucun autre effondrement localisé historique n'est connu sur la commune. La description du diamètre et de la profondeur du cratère permet de qualifier l'intensité de modérée (Illustration 18) :

Classe d'intensité	Diamètre du cratère	Profondeur du cratère
Très limité	Effondrement auto-remblayé (profondeur centimétrique)	
Limitée	$\varnothing < 3 \text{ m}$	$1 < 0,50 \text{ m}$
Moyenne	$3 \text{ m} < \varnothing < 10 \text{ m}$	$0,5 < 1 < 2 \text{ m}$
Elevée	$\varnothing > 10 \text{ m}$	$1 > 2 \text{ m}$

Illustration 18 – Qualification de l'intensité selon le diamètre et la profondeur du cratère (Josien JP, 2006)

En conclusion, dans le cadre de l'étude de Farébersviller, c'est une cartographie de la susceptibilité d'apparition qui va conditionner les classes de l'aléa car l'intensité des phénomènes sera considérée modérée sur l'ensemble de la commune.

- Dans les formations du Keuper

La partie sud de la commune est concernée par la formation des marnes irisées inférieures. Dans ces formations, les intercalations de gypse sont fréquentes. Ils se présentent en amas lenticulaires de puissance variable. Aucun désordre n'est connu dans ces formations sur la commune de Farébersviller. En absence de désordre, seule la susceptibilité d'apparition sera cartographiée sur la commune.

3.3. ESTIMATION DE LA PROBABILITE D'APPARITION

Concernant, la probabilité d'apparition et de l'évolution des affaissements et des effondrements, cet aspect dépend essentiellement des facteurs de prédisposition suivants : l'épaisseur de la couverture, le volume de vide disponible, l'évolution du front de dissolution et le réseau de failles / fractures.

3.3.1. Epaisseur de la couverture

Les terrains de la couverture vont en partie atténuer la déformation engendrée par un vide en profondeur. Par conséquent, plus l'épaisseur de la couverture est importante, moins les déformations en surface sont élevées. L'apparition d'un affaissement/effondrement en surface dépend en partie de l'épaisseur de la couverture géologique au-dessus de la couche d'évaporite :

- dans le cas d'un affaissement, Les dimensions de la zone affaissée vont dépendre de l'extension de la cavité éboulée et de l'angle de propagation des désordres dans les terrains de couverture ;

- dans le cas d'un effondrement, la remontée de fontis peut être stoppée par le foisonnement des matériaux éboulés (auto-comblement) ou par la présence d'un banc raide. Quand le vide est suffisamment important, au regard de l'épaisseur de recouvrement, les matériaux éboulés et foisonnés se répandent sans obturer la cloche et les désordres atteignent la surface. Il prend la forme d'un entonnoir ou celle d'un cratère pseudo-circulaire.

Les phénomènes seront limités par :

- le mur de la couche rouge au nord de la commune. Au-delà de cette limite, les formations rencontrées sont celles du Muschelkalk inférieur surmontant les grès du Buntsandstein ;
- le mur du Keuper inférieur au sud délimite la formation du Keuper susceptible de contenir des formations évaporitiques ;
- la cartographie de l'aléa effondrement localisé sera limité par la hauteur de l'auto-comblement des vides au toit des couches grises ;
- la cartographie de l'aléa affaissement sera limité par la présence de sel (absence de sel à moins de 50 m de profondeur) au nord de la commune. En effet, on peut supposer la dissolution du gypse seul ne sera pas suffisant pour initier l'apparition d'une cuvette d'affaissement en surface.

3.3.2. Volume de vide

L'apparition de désordre en surface dépend également du volume des vides créés en profondeur. En effet, plus le volume de vide disponible est important, plus le déplacement vertical de la déformation est important. Le volume potentiel de vide pouvant être créé par dissolution est lié à l'épaisseur des formations évaporitiques.

Sur Farébersviller, les forages réalisés n'ont jamais totalement traversé les évaporites. L'épaisseur total d'évaporite est difficile à estimer :

- l'interprétation de 1911 indique le lessivage de 32,5 m d'anhydrite et de sel. Le forage le plus proche décrivant les évaporites est celui de Sarralbe avec 56,5 m d'évaporites ;
- les données de forage les plus proches de l'effondrement historique de 1930 (Trou du Diable) indiquent des vides allant jusqu'à 5 m de puissance. Le toit de ces vides serait situé entre 210 et 217 m NGF (entre 18 et 25 m de profondeur) au sein des couches grises du Muschelkalk moyen. L'extension de ces vides est inconnue ;
- les épaisseurs de sel rencontrées en forage sont de 4.5 mètres (forage S1) et 7.1 m (forage S2) ;
- le gypse a été reconnu en forage sur des épaisseurs supérieures à 20 m (intercalations non massives). Il est sous forme de lentilles ou filons sur des épaisseurs massives inférieures à 50 cm.

Dans le cadre d'une dissolution complète de la couche de sel, soit 56 m de « vide franc », les mouvements en surface seraient conséquents. Cependant :

- la puissance totale d'évaporites ne correspond pas à des évaporites massives. De nombreuses intercalations de formations argileuses sont présentes ;
- le sel étant imperméable, les circulations d'eau et la dissolution sont généralement confinées au toit du sel sans y creuser de cavités de grande taille (Feuga, 2009). Par conséquent, dans cette configuration la dissolution impacte alors non pas l'ensemble de la couche de sel mais seulement une partie du sommet.

Les vides rencontrés peuvent être soit des vides francs (reconnus en forage sur une épaisseur maximum de 5 m), soit des zones décomprimées. Ces zones décomprimées peuvent être liées (Guide INERIS, 2017) :

- à la nature même du gypse (faciès gypseux saccharoïdes) entraînant une dissolution partielle des horizons ;
- à la déstructuration mécanique des terrains dans le cas d'une cavité qui s'auto-colmate.

Une relation théorique directe entre épaisseur des évaporites et affaissement en surface n'est donc pas appropriée. L'épaisseur des formations évaporitiques ne constitue donc pas un facteur de prédisposition suffisamment discriminant et pertinent pour être pris en compte.

3.3.3. Evolution du front de dissolution

La compréhension des processus et mécanismes contrôlant la dissolution des formations en profondeur est complexe en raison des nombreuses difficultés à caractériser le fonctionnement hydrochimique et hydrodynamique des eaux souterraines (Zechner et al, 2011).

Pour qu'un processus de dissolution se mette en place, il faut que le fluide qui est en contact avec le minéral soluble (gypse et/ou sel) soit sous-saturé. Dans ce cas, la concentration s'accroît au sein du fluide jusqu'à ce qu'elle atteigne la saturation et qu'elle perde toute capacité de dissolution. Pour qu'une dissolution se poursuive au cours du temps il faut garantir la sous-saturation de ce fluide. Il est donc nécessaire pour la dissolution que l'écoulement de ce fluide soit suffisant pour le renouveler régulièrement au contact du solide (guide INERIS, 2017).

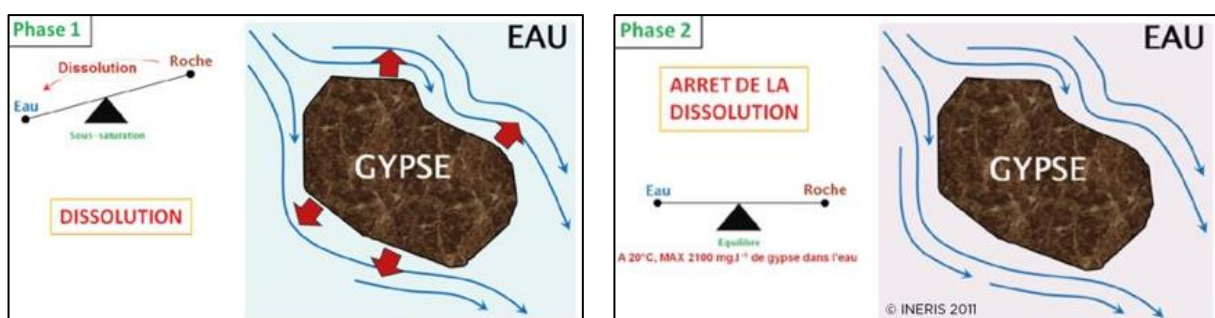


Illustration 19 – Arrêt de la dissolution en présence d'eau saturée
(Guide INERIS-CEREMA 17-164710-03375A)

En générale, 4 conditions doivent être réunies pour engendrer une dissolution rapide (Johnson, 1981) :

- un dépôt contre lequel, à travers lequel, l'eau peut circuler ;
- un apport d'eau sous-saturé ;
- un exutoire permettant au fluide de s'échapper et d'être renouvelée par de l'eau sous-saturé ;
- une énergie fournie par le gradient hydraulique et/ou de densité qui induit un écoulement de l'eau souterraine.

La caractérisation de ces 4 conditions permet d'évaluer, voire de quantifier, l'évolution du front de dissolution.

Sur la commune de Farébersviller, seule la présence des dépôts d'évaporites est avérée et relativement bien quantifiée (géophysique et forages). Bien que l'infiltration d'eau douce en profondeur soit fortement suspectée comme le moteur de la dissolution, aucune analyse n'a encore permis de déterminer son rôle. Enfin à l'heure actuelle aucun exutoire à la nappe salée n'a été identifié et le gradient hydraulique/densité n'est pas caractérisé.

Par conséquent, actuellement le fonctionnement hydrogéologique connu est peu contraint et présente de nombreuses incertitudes (gradient hydraulique/densité, échange avec la nappe superficielle, quantification de l'infiltration, connexion entre les structures faillées, perméabilité des failles, exutoire, etc...). Les données actuelles ne permettent pas de quantifier l'évolution future de la dissolution sur la commune. Cependant un certain nombre d'éléments permet d'appréhender qualitativement cette évolution.

L'extension de la nappe salée vers le nord en suivant la vallée du Kochernbach est plus que probable. Les phénomènes de dissolution du gypse s'étendraient donc jusqu'à la zone d'affleurement du mur des couches rouges.

Les déplacements verticaux maximum observés entre 1908 et 2016 sont de 27,6 cm/an (données nivellement entre 1993-1996) (Illustration 20). L'interférométrie radar montre des déplacements entre 2007 à 2010 de 8 cm/an.

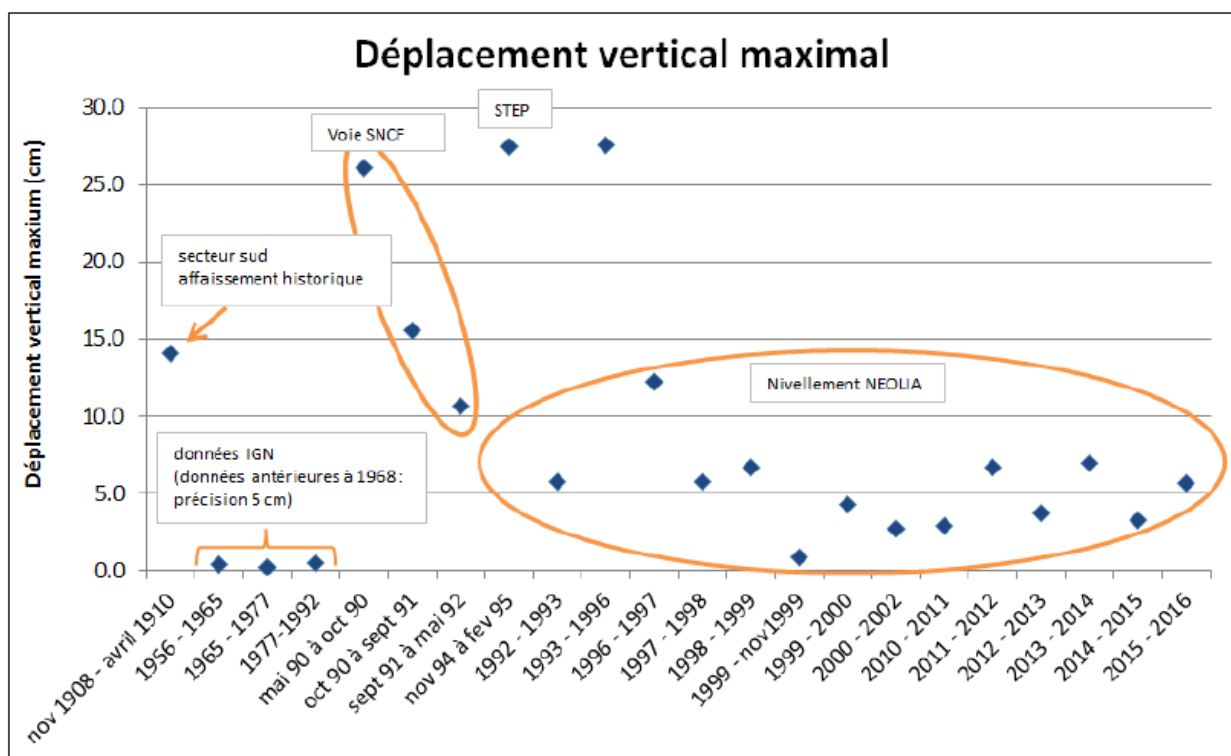


Illustration 20 – Répartition des déplacements annuels verticaux maximum mesurés en fonction du temps

En l'absence d'éléments tangibles pour quantifier l'évolution du front de dissolution, la cartographie sur la commune de Farébersviller prendra donc en compte par défaut la susceptibilité à la dissolution des secteurs identifiés par géophysiques.

3.3.4. Influence des failles/fractures

L'évolution des dissolutions semble être guidée par les discontinuités géologiques de type fractures/failles identifiées par les campagnes de géophysique.

Dans les milieux fracturés, les failles/fractures peuvent jouer un rôle de circulation préférentielle des eaux souterraines et donc favoriser la dissolution. A contrario, selon le contexte, les discontinuités peuvent également jouer un rôle de barrières hydrauliques.

Sur le secteur, les circulations préférentielles semblent être privilégiées le long des plans de discontinuités. Par contre, il est probable que ces plans de discontinuité puissent jouer également un rôle de barrière hydraulique aux écoulements orthogonaux. La cartographie de l'aléa sera par conséquent localement influencée par la répartition spatiale des discontinuités identifiées par les campagnes de géophysique.

3.4. CARTOGRAPHIE DE L'ALEA AFFAISSEMENT

La cartographie de l'aléa affaissement sera limité par la présence de sel (absence de sel à moins de 50 m de profondeur) au nord de la commune. En effet, on peut supposer que la dissolution de gypse seul ne sera pas suffisant pour initier l'apparition d'une cuvette d'affaissement en surface. Le limite du toit du sel comprend une incertitude de 50 m.

Les deux facteurs de prédisposition principaux sont la profondeur du sel et la susceptibilité à la dissolution, ce qui conduit à la matrice suivante⁶ (Illustration 21) :

⁶ La matrice est construite de manière similaire à celle de Hilsprich. La définition des zone d'influence correspond au retour d'expérience de Hilsprich.

		Profondeur du toit du sel			
		Sup, à 100 m	80 m à 100 m	80 m à 50 m	Inf. à 50 m
Susceptibilité à la dissolution	Très faible Zone à plus de 400 m de la zone de susceptibilité forte	faible	faible	faible	Pas de sel
	Faible Zone à moins de 400 m de la zone de susceptibilité forte	faible	moyen	moyen	
	Moyenne Zone à moins de 200 m de la zone de susceptibilité forte	moyen	moyen	fort	
	Forte Zone de dissolution active + marge d'incertitudes/influence de 100 m	fort	fort	fort	

Illustration 21 - Matrice d'évaluation de la prédisposition au phénomène d'affaissement sur la commune de Farebersviller

La zone de dissolution active correspond aux zones 1, 2 et 3 de la synthèse géophysique présentée en Illustration 15.

Le facteur aggravant de la présence de gypse au toit du sel est pris en considération dans la matrice. En effet, la susceptibilité à la dissolution est évaluée à forte quelle que soit la profondeur du toit du sel.

La cartographie de l'aléa ne se réduit pas aux croisements des facteurs de prédisposition identifiés dans la matrice et une approche de type expert est également mise en œuvre en parallèle pour prendre en compte le contexte géologique structural (notamment la présence de failles).

3.4.1. Facteurs aggravants

L'évaluation de l'aléa est également conditionnée par l'évolution de l'affaissement en surface (interférométrie radar et campagnes de nivellement), témoin par défaut de l'évolution de la dissolution en profondeur.

Evolution actuelle

Un niveau d'aléa très fort est appliquée sur le secteur déterminé par la cuvette d'affaissement en surface déterminée par interférométrie radar en 2010 à laquelle une zone tampon de 50 m a été appliquée pour tenir compte de l'évolution de la déformation observée depuis cette date⁷.

⁷ Valeur issue du retour d'expérience sur Hilsprich

Evolution future

De nombreuses incertitudes demeurent sur l'évolution future du phénomène d'affaissement, notamment concernant l'évolution du front de dissolution en profondeur. Ces incertitudes ont été prises en compte à proximité de la cuvette d'affaissement dans la cartographie de l'aléa en définissant des zones tampons (par rapport à la cuvette d'affaissement définie par interférométrie radar en 2010) ayant un niveau d'aléa minimum :

- zone tampon de 150 m : niveau d'aléa minimum fort ;
- zone tampon de 250 m : niveau d'aléa minimum moyen.

Sur le secteur investigué l'aléa a été cartographié sur la base de facteurs de prédisposition d'épaisseur de la couverture, de la susceptibilité à la dissolution et de la présence de discontinuités (failles/fractures). L'état de connaissance parcellaire n'a pas permis d'engager une quantification de l'évolution du phénomène de dissolution. La cartographie de l'aléa sur la commune de Farébersviller est par conséquent cantonnée à une démarche qualitative de type expert.

Cependant, sur le secteur non investigué, en raison de la présence probable de sel dans le sous-sol de l'intégralité de la commune, il n'est pas concevable que ce secteur ne présente pas d'aléa ou qu'un aléa nul soit défini par défaut.

Par conséquent, sur les secteurs non investigués :

- les zones d'aléa moyen à fort caractérisées ont été prolongés et/ou fermés à dire d'expert ;
- l'aléa a été qualifié par défaut et a minima de niveau faible sur l'ensemble des secteurs dans lesquels le toit du sel est à plus de 50 m de profondeur.

3.4.2. Synthèse

L'aléa affaissement de la commune de Farébersviller est présenté en Illustration 22 au 1/25 000^{ème} et en annexe 8 au 1/5 000^{ème}.

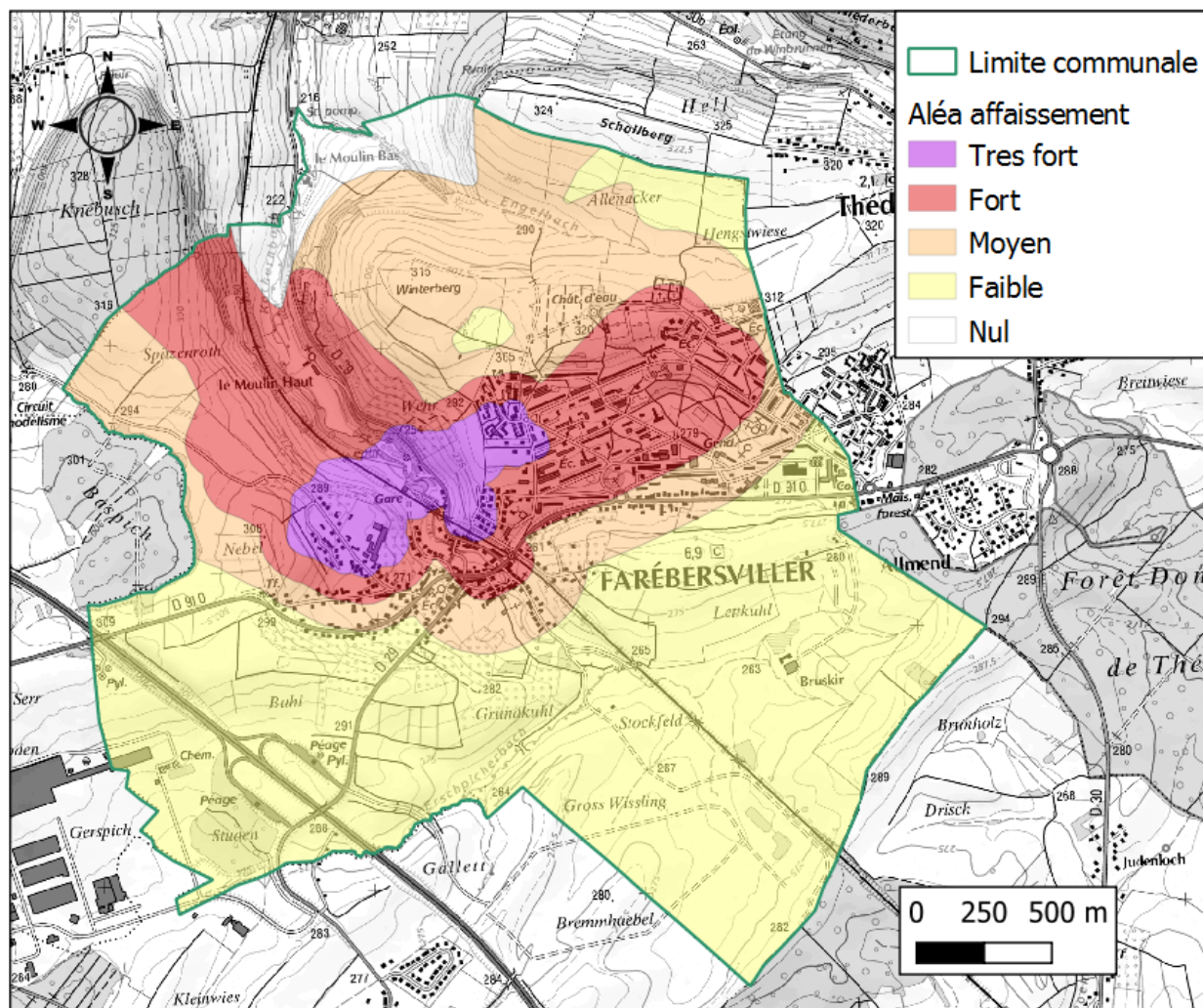


Illustration 22 – Cartographie de l'aléa affaissement sur la commune de Farebersviller

3.5. CARTOGRAPHIE DE L'ALEA EFFONDREMENT LOCALISE

La prédisposition est évaluée selon le guide méthodologique (Illustration 23) :

- de sensible à très sensible pour les formations du Muschelkalk moyen (couches grises et rouges) : « gisement avéré » et « circulation d'eau agressives » (phénomène de dissolution avéré). Le limite entre une prédisposition sensible ou très sensible est établie en fonction des désordres.
- de peu sensible pour les formations du Keuper inférieur : « gisement suspecté » et « circulation peu probable ou eaux saturées ».

Prédisposition à l'aléa mouvements de terrain lié à la dissolution du gypse		Potentiels hydrodynamique et hydrochimique des eaux	
		Circulation peu probable ou eaux saturées	Circulation d'eaux agressives vis-à-vis du gypse
Gisement	Absent	Nulle	Nulle
	Suspecté	Peu sensible	Sensible
	Avéré	Peu sensible	Sensible à très sensible

Illustration 23 – Qualification initiale de la prédisposition (Guide INERIS-CEREMA 17-164710-03375A)

3.5.1. Pour les formations du Muschelkalk

La cartographie de l'aléa effondrement localisé est située entre :

- le mur de la couche rouge au nord de la commune cartographiée selon la carte géologique non harmonisée ;
- la hauteur de l'auto-comblement des vides au toit des couches grises.

L'auto-comblement des vides correspond à l'arrêt du phénomène lorsque le volume foisonné de la cheminée est égal au volume disponible dans la cavité de la cheminée. Pour calculer la hauteur de l'auto-comblement, il convient de connaître les dimensions des vides et le coefficient de foisonnement. Ce coefficient correspond au rapport entre le volume disponible dans la cavité et le volume occupé par les terrains déconsolidés. Il est directement lié à la nature des terrains constituant le recouvrement. Des valeurs sont disponibles dans la littérature, en particulier dans les données des « Recommandations pour les Terrassements Routiers » (RTR) (annexe 7).

La hauteur de l'auto-comblement des vides prise en 2003 était égale à 35 m (valeur prise en fonction des désordres observées). Cette valeur nécessite d'être mise à jour en fonction des derniers forages réalisés dans le fond de la vallée (forages réalisés en 2007). Sur les 11 forages réalisés, 4 forages indiquent des vides : 0,8 m, 2,5 m, 3,5 m et 5 m. Aucune indication de l'extension de ces vides n'est connue mais les forages sont distants d'environ 20 m.

Un rapide calcul effectué sur l'application FONTIS de l'INERIS pour une « galerie » elliptique permet de trouver des remontées de fontis allant de 10 m, 30 m, 40 m et 60 m :

- un coefficient de foisonnement de 1,25 pour les argiles (classe RTR : argiles et marnes très plastiques) ;
- une hauteur du vide de 0,8 m, 2,5 m, 3,5 m et 5 m ;
- la largeur du vide étant inconnue, elle a été estimée à moins de 10 m (demi distance entre les forages).

Une valeur sécuritaire de 60 m a été retenue, correspondant à la limite maximum au-delà de laquelle les effondrements sont auto-comblés. Une limite intermédiaire a été prise à 35 m, justifiée par l'existence des désordres en surface (trou du diable, désordres de la STEP). Cette limite permet de considérer une prédisposition très sensible entre 0 et 35 m et une prédisposition sensible entre 35 et 60 m. L'aléa effondrement localisé est donc cartographié :

- aléa de niveau fort entre 0 et 35 m : intensité modérée, prédisposition très sensible ;
- aléa de niveau moyen entre 35 et 60 m : intensité modérée, prédisposition sensible.

L'incertitude sur les limites de l'aléa est estimée à 50 m (fonction de la carte géologique).

L'aléa effondrement localisé sur la commune de Farébersviller est présenté en Illustration 24 au 25 000^{ème} et en annexe 8 au 1/5 000^{ème}.

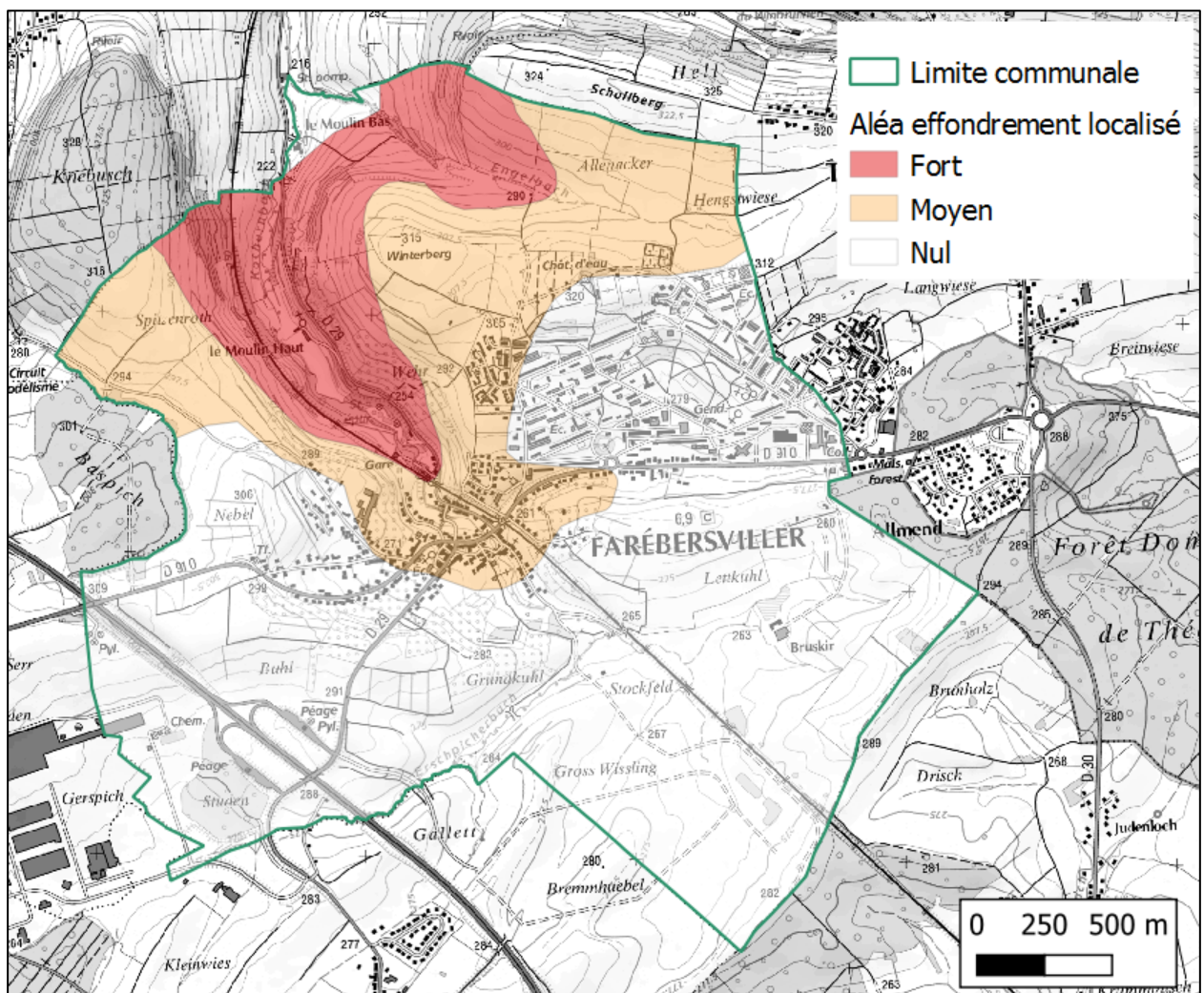


Illustration 24 – Carte de l'aléa effondrement localisé

3.5.2. Pour les formations du Keuper

Les formations du Keuper qui affleurent dans la partie sud de la commune sont susceptibles de contenir des évaporites. Toutefois, leur faible épaisseur à l'affleurement fait que ne peuvent subsister que le gypse et/ou l'anhydrite, le sel gemme ayant été en grande partie dissout. La probabilité d'apparition d'effondrements localisés dans cette partie de la commune ne peut être écartée a priori mais elle est faible en raison d'absence de présence avérée d'évaporites. Elle ne permet pas une caractérisation du niveau l'aléa. L'incertitude sur cette cartographie est évaluée à 50 m selon les limites de la carte géologique (Illustration 25).

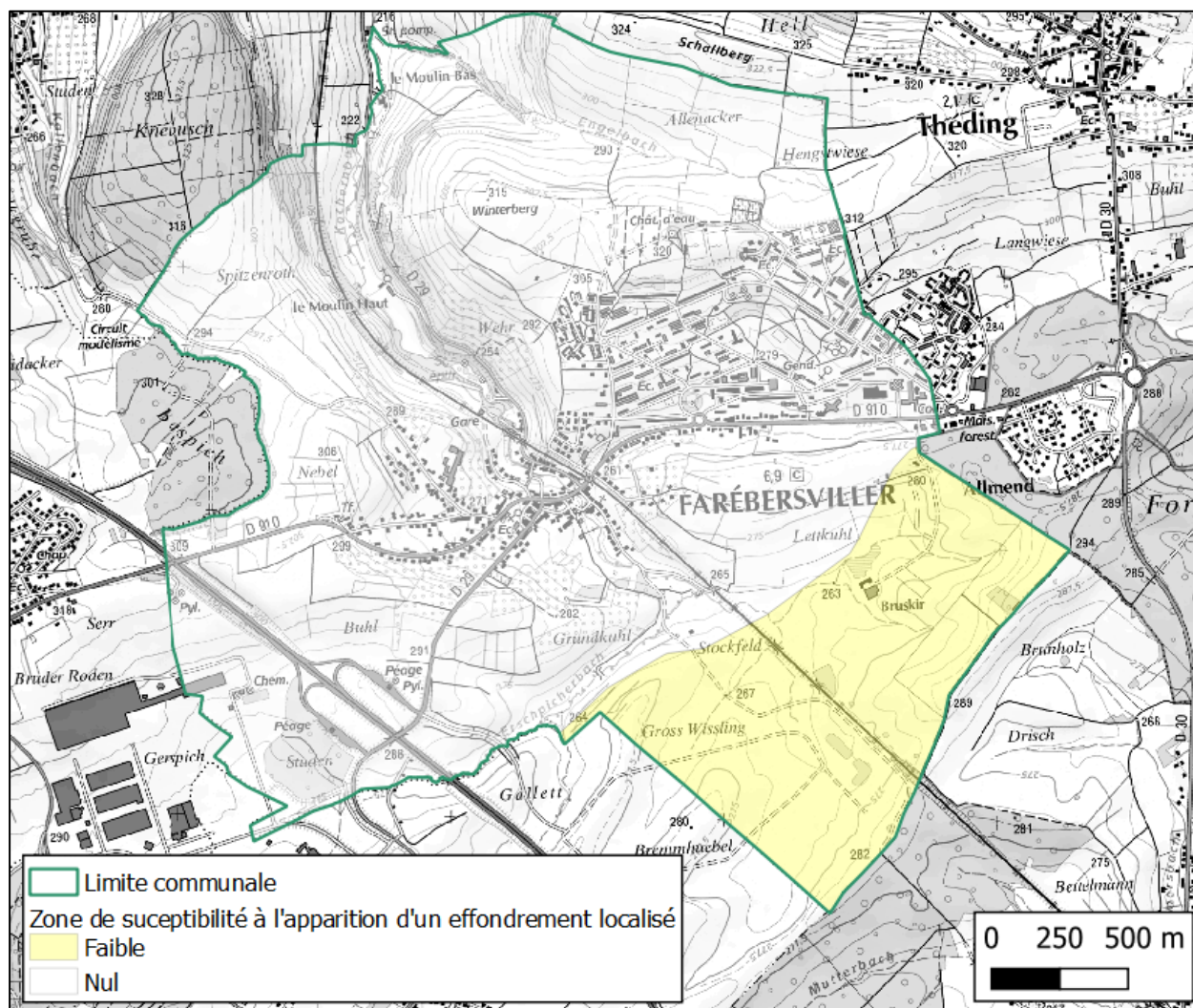


Illustration 25 – Carte de susceptibilité à l'apparition d'un effondrement localisé dans les formations du Keuper

3.6. LIMITE DES CARTES ET ECHELLE DE RESTITUTION

Le territoire de la commune de Farébersviller a été investigué sur 3,27 km² soit 47 % de la surface communale.

La cartographie de l'aléa est basée sur l'analyse des sources documentaires disponibles (méthodologies, connaissances des mécanismes...) à la date de sa réalisation et sur l'exploitation des événements historiques connus. L'étude est donc le reflet de la connaissance au moment de sa réalisation. La prise en compte ultérieure de données non connues ou non disponibles pendant cette période (outils et méthodologies, investigations, évolution du phénomène d'affaissement (désordres/déformations), données hydrogéologiques, témoignages, etc...) peut conduire à une révision des critères d'analyse de l'aléa et donc de son expression cartographique. Ceci est d'autant plus vrai pour la cartographie de l'aléa en dehors de la zone investiguée où la profondeur du sel, la présence d'une nappe salée et de failles n'ont pas été caractérisées.

Les cartes d'aléa sont restituées sur les fonds cadastraux à l'échelle du 1/5 000^{ème}. Toute opération de zoom sur une carte au 1/5 000^{ème} pour en agrandir l'échelle est en dehors du domaine de validité de la cartographie.

3.7. EVALUATION DU RISQUE

L'évaluation du risque est donnée en croisant les aléas avec les bâtiments.

Un traitement a été réalisé sous Qgis pour reprendre les données de la table bâtiment de la BDtopo et les faire correspondre à l'orthophotographie aérienne. Les bâtiments dont la superficie totale dans la BDtopo est inférieure à 10 m² n'ont pas été pris en compte dans l'analyse. En fonction des données disponibles (BD Topo, parcellaire, orthophotographie aérienne (IGN et Google Earth), photographie de StreetView et cartes du rapport de présentation du PLU de 2014), les bâtiments ont été répartis en 4 classes (Illustration 26) :

- bâtiment individuel ;
- bâtiment collectif ;
- bâtiment remarquable : Bâtiment religieux, Ecole, Mairie, bâtiment industriel, bâtiment commercial, bâtiment médical, château d'eau...
- bâtiments divers : garage, jardin ouvrier, remise, WC public...

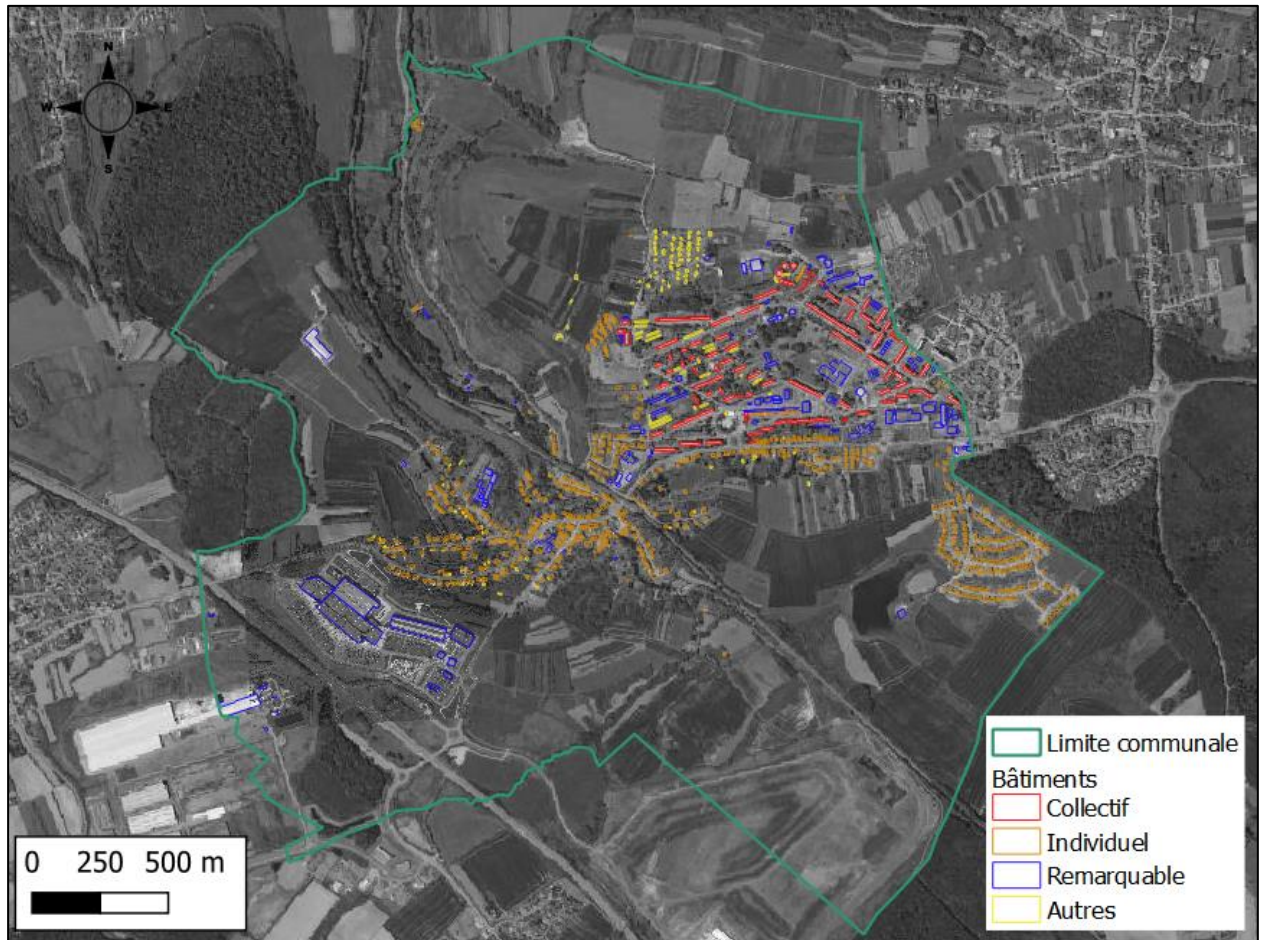


Illustration 26 – Carte de répartition des bâtiments sur la commune de Farebersviller (orthophotographie de l'IGN + ajout du centre commercial avec Google Earth)

A l'issu du traitement, un total de 1069 bâtiments a été conservé (Illustration 27). La typologie des bâtiments n'a pas fait l'objet d'une vérification systématique. Il est donc possible que certains bâtiments ne soient pas dans la bonne catégorie.

		très fort	fort	moyen	faible	nul
Aléa effondrement localisé	TOTAL	absence	14	420	absence	488
	Bâtiment « individuel »		9	331		399
	Bâtiment « collectif »		0	6		79
	Bâtiment « remarquable »		4	31		99
	Bâtiment « autres »		1	52		58
Aléa affaissement généralisé	TOTAL	111	382	322	242	4
	Bâtiment « individuel »	89	239	202	205	4
	Bâtiment « collectif »	2	58	22	3	0
	Bâtiment « remarquable »	12	57	33	32	0
	Bâtiment « autres »	8	28	65	10	0
Susceptibilité à l'effondrement localisé dans les formations du Keuper	TOTAL	absence	absence	absence	144	absence
	Bâtiment « individuel »				143	
	Bâtiment « collectif »				0	
	Bâtiment « remarquable »				1	
	Bâtiment « autres »				0	

Illustration 27 – Identification du nombre de bâtiments concerné par les aléas liés aux dissolutions

4. Conclusions et recommandations

La cartographie de l'aléa sur la commune de Farébersviller a été réalisée à partir des données interprétées de profil électriques. Les hypothèses et interprétations émises dans ce rapport sont à prendre avec précaution. En effet, les contraintes locales (densification de la zone urbaine, voie ferrée...) rendent délicat le positionnement et l'interprétation des données électriques et sismiques. L'horizon de sel n'est mis en évidence que dans les secteurs où il est affecté par la dissolution. En dehors de ce secteur, sa localisation est extrapolée.

4.1. SYNTHÈSE

Les désordres en surface sur la commune de Farébersviller s'expliquent par la dissolution naturelle en profondeur d'une couche ou de plusieurs couches d'évaporites (sel gemme et gypse). Les dissolutions entraînent un transfert de matière entre les masses d'eau non saturée et les masses d'eau saturées permettant de créer un vide.

Les mouvements de terrain observés et suivis depuis plusieurs années sur la commune de Farébersviller sont caractérisés à la fois par le développement en surface de dépressions topographiques en forme de cuvette à grand rayon de courbure et par des cratères d'effondrement important (d'ordre métriques). Ces phénomènes d'affaissement et d'effondrement sont provoqués par dissolution d'une couche de sel profonde associée à des lentilles de gypse. Sur la commune de Farébersviller, l'appréciation de l'importance du dommage est très variable allant des dommages très légers à très sévères, jusqu'à la ruine partielle ou totale du bâtiment.

Le suivi d'évolution (campagnes de mesures topographiques successives) engagé sur la commune et les données interprétées de l'interférométrie radar, mettent en évidence que l'instabilité qui s'est déclarée dans les années 1900 sur le territoire de Farébersviller, est toujours actif à ce jour (2019). Le phénomène semble irrégulier avec des phases successives d'accélération et d'accalmie.

Les investigations géophysiques par la méthode de la tomographie de résistivité, complétées par un profil de sismique, réalisée en 2017-2018 permet de tirer les conclusions suivantes :

- deux phénomènes de dissolution des horizons évaporitiques ont été mis en évidence :
 - dissolution des amas de gypse lenticulaire située dans la partie supérieure des couches grises ;
 - dissolution d'un horizon de sel de 5 à 7 m de puissance situé dans la partie inférieure des couches grises.
- des phénomènes de dissolution sont contrôlés par la structure des assises du secteur d'étude, à savoir :
 - le pendage des couches qui est de l'ordre de 4° vers le sud-est. La progression des nappes salées se fera donc globalement vers le nord ;
 - les zones de fracturation associées aux failles qui constituent des entrants pour l'eau douce et des drains préférentiels pour la circulation des eaux ;
 - une structure effondrée de type graben, de 200 m de largeur, traverse la zone d'étude en parfaite corrélation avec la vallée du Kochernbach. L'effondrement, d'origine tectonique, a probablement été amplifié par les dissolutions de gypse et de sel.

Les interprétations de géophysiques ont permis de localiser, avec plus ou moins d'incertitude, la base des couches grises supérieures. Compte tenu des caractéristiques électriques, il est très probable que cette interface corresponde au mur de l'aquifère du Muschelkalk.

Bien que l'infiltration d'eau douce en profondeur soit fortement suspectée comme le moteur de la dissolution, aucune analyse n'a encore permis de déterminer son rôle. Enfin à l'heure actuelle aucun exutoire à la nappe salée n'a été identifié et le gradient hydraulique/densité n'est pas caractérisé. Par conséquent, actuellement le fonctionnement hydrogéologique connu est peu contraint et présente de nombreuses incertitudes (gradient hydraulique/densité, échange avec la nappe superficielle, quantification de l'infiltration, connexion entre les structures faillées, perméabilité des failles, exutoire, etc...). Les données actuelles ne permettent pas de quantifier l'évolution future de la dissolution sur la commune. Cependant un certain nombre d'éléments permet d'appréhender qualitativement cette évolution.

La cartographie des aléas sur la commune de Farébersviller est réalisée suivant une approche de type expert basée sur le retour d'expérience de Hilsprich et le guide méthodologique de dissolution naturelle. L'affectation à une zone d'un niveau d'aléa est nuancée au regard des différents résultats issus de l'étude satellitaire d'interférométrie radar, de géophysique électrique et sismique, du contexte structural et géologique et des désordres observés.

Cette cartographie repose sur l'estimation d'une intensité selon les désordres observés (pente dans le cas de l'affaissement et diamètre du cratère dans le cas de l'effondrement). L'estimation de la probabilité d'apparition repose principalement sur l'épaisseur de la couverture, le volume de vide disponible, l'évolution du front de dissolution et le réseau de failles / fractures.

La probabilité d'apparition de désordres dus à la dissolution dans les formations du Keuper affleurant au sud de la commune n'est pas à écarter même si elle est faible en raison de l'absence de présence avérée d'évaporites. Les cartographies présentées dans cette étude incluent déjà une incertitude de localisation.

Le croisement des bâtiments avec les aléas ont permis de considérer qu'environ 46 % des bâtiments sont situés en aléa fort à très fort lié au phénomène d'affaissement généralisé incluant de nombreux ERP (Etablissement Recevant du Public).

4.2. RECOMMANDATIONS

L'objectif de cette étude était de fournir une cartographie des aléas affaissement et effondrement sur la commune de Farébersviller à partir de l'acquisition de nouvelles données. Enfin, les cartes d'aléas présentées dans ce rapport ne sont que le fruit d'une compréhension des données qui sont disponibles à un instant donné. Elle peut évoluer en fonction de nouvelles connaissances. Ces nouvelles connaissances pourraient consister en :

- un suivi topographique en surface permettrait de mieux préciser et de suivre l'évolution des mouvements de Farébersviller et de pouvoir répondre avec plus de précision sur l'évolution spatiale et temporelle de la cuvette et fournir une aide à la décision objective pour déterminer les phénomènes à l'origine des désordres observés (affaissement, effondrement, retrait gonflement des argiles etc.) :
 - par l'implantation de réseaux topographiques couvrant *a minima* l'intégralité de la surface urbanisée de la commune ainsi que les principaux axes routiers (mesures de la longitude X, latitude Y et altitude Z) ;

- par interférométrie radar satellitaire conventionnelle et sur réflecteurs persistants après une période observation d'environ cinq années pour suivre l'évolution des cuvettes en zone urbanisée et surtout en zone non urbanisée.
- une campagne de forage couplée à des diagraphies électriques : cette campagne de forage devra permettre notamment de lever les incertitudes sur la zone 2. La cartographie de la phase de dissolution active en zone 2 ne repose que sur deux tomographies de résistivité séparées de 900 m environ ce qui constitue une lacune importante. De plus le profil 10 étant entièrement en zone urbaine, il n'est pas exclu que des artéfacts de mesures dus aux réseaux aient perturbés l'interprétation ;
- une campagne de géophysique complémentaire pour délimiter l'extension du phénomène :
 - la poursuite du phénomène au nord-est est plus que probable. Des tomographies de résistivité implantées perpendiculairement à la vallée seraient nécessaire pour déterminer la limite d'extension ;
 - les phénomènes de dissolution du gypse et du sel dans la partie inférieure du Muschelkalk moyen ne seraient plus actifs. Cette conclusion reste à confirmer par une tomographie de résistivité implantée NE-SW. Ce profil électrique, programmé initialement, n'a pu être réalisé pour des raisons d'autorisation et d'accessibilité.

5. Bibliographie

Feuga B. (2009) - Les effondrements dus à l'exploitation du sel: Geosciences, p. 86–95.

Geoderis (2018) - Cartographie des zones soumises au phénomène de remontée des nappes dans le bassin houiller lorrain (57). Rapport E2018/034DE.

Goguel J., Guillaume M., Guillaume L., Meyer G., Schumacher E., Van Werveke L., Lemoine M. (1960) - Carte géol. France (1/50 000), feuille Saint-Avold (165). Orléans : BRGM. Notice explicative par Goguel J., Guillaume M., Guillaume L., Meyer G., Schumacher E., Van Werveke L., Segond R. (1960), 6 p.

INERIS – CEREMA (2017) – Dissolution naturelle du gypse dans le sous-sol. Analyse et gestion des aléas mouvements de terrain de type affaissement et effondrement. Rapport INERIS 17-164710-03375A.

Johnson K.S. (1981) - Dissolution of salt on the east flank of the Permian Basin in the southwestern U.S.A.: Journal of Hydrology, v. 54, p. 75–93, doi: 10.1016/0022-1694(81)90153-0.

Josien JP. (2006) – Qualification de l'aléa fontis. Méthodologie pour le bassin ferrifère lorrain. Rapport GEODERIS E2006-320DE – 06LOR2500.

Le Goff J., Raucoules D. (2017) – Synthèse des données de mouvements de terrain et analyse par interférométrie radar sur la commune de Farébersviller (57). Rapport BRGM/RP-67054-FR, 94 p., 80 fig., 7 annexes.

Sedan-Miégemole O., Baubron J-C., Becker E., Fourniguet G. (2003) – expertise de l'aléa mouvements de terrain du territoire de la commune de Farébersviller (Moselle). Rapport BRGM RP-52533-FR, 58 pages, 29 figures, 9 photos, 5 annexes.

Vallet A., Le Goff J., Mathieu F. (2017) – Phénomène d'affaissement lié à des dissolutions sur la commune de Hilsprich. Révision de la carte d'aléa. Nouvelles investigations géologiques et géophysiques. Rapport final. BRGM/RP-67282-FR, 112 p., 44 ill., 5 ann., 1 CD.

Annexe 1 :

Glossaire/Terminologie/Sigles

Aléa

Phénomène naturel (inondation, mouvement de terrain, séisme, avalanche, incendies de forêts...) d'occurrence et d'intensité données. Cette définition élargit la notion initiale la plus appropriée " probabilité d'occurrence d'un phénomène naturel ", qui avait été retenue en 1984 par la délégation aux risques majeurs (DRM) à partir du concept anglo-saxon de " natural hazard " pour l'appliquer aux PER. L'aléa devait ainsi être hiérarchisé et cartographié en plusieurs niveaux, en croisant l'intensité des phénomènes avec leurs probabilités d'occurrence. Cela reste vrai pour les PPRN inondation qui devront indiquer des hauteurs de submersion et des vitesses d'écoulement pour une période de retour au moins centennale. D'autres phénomènes, par contre, sont moins facilement ou non probabilisables (bien que cela dépende aussi de l'échelle de temps à laquelle on se réfère). En ce qui concerne les mouvements de terrain, par exemple, la probabilité d'occurrence paraît souvent difficile à estimer. On recourra alors à une approche qui s'appuiera sur l'évaluation de la prédisposition du site au type de phénomène concerné. Pour l'érosion littorale, on cherchera plutôt à évaluer la position du trait de côte à une échéance choisie, en général cent ans (définition issue du guide PPRN de 2016)

Aquifère

Formation hydrogéologique perméable permettant le drainage et la captation de nappes d'eau (définition issue du Guide INERIS – CEREMA, 2017)

Catastrophe naturelle

Phénomène ou conjonction de phénomènes dont les effets sont particulièrement dommageables. Le niveau de dommages retenu pour définir l'état de catastrophe diffère au plan international selon les instances. En France, il n'est pas fixé. Cette définition est différente de celle de l'article 1^{er} de la loi n°82-600 du 13 juillet 1982 relative à l'indemnisation des victimes des catastrophes naturelles, qui indique : " Sont considérés comme effets des catastrophes naturelles [...] les dommages matériels directs ayant eu pour cause déterminante l'intensité anormale d'un agent naturel, lorsque les mesures habituelles à prendre pour prévenir ces dommages n'ont pu empêcher leur survenance ou n'ont pu être prises. " La catastrophe est ainsi indépendante du niveau des dommages causés. La notion " d'intensité anormale " et le caractère " naturel " d'un phénomène relèvent d'une décision interministérielle qui déclare " l'état de catastrophe naturelle " (définition issue du guide PPRN de 2016)

Cavité souterraine

Vide présent dans le sous-sol, et dont l'origine est anthropique ou naturelle (définition issue du Guide INERIS – CEREMA, 2017)

Charge hydraulique

Différence de niveau piézométrique entre deux points d'une ligne de courant qui donne naissance à un écoulement (définition issue du Guide INERIS – CEREMA, 2017)

Désordres

Expression des effets directs et indirects d'un phénomène naturel sur l'intégrité et le fonctionnement des milieux. Ils sont caractérisés par différents indicateurs : physiques : désordres hydrauliques (érosion de berges), géologiques etc. ; socio-économiques : dysfonctionnements liés aux atteintes des services publics (eau potable, électricité, gaz, hôpitaux, etc.) ; humains : population isolée... (définition issue du guide PPRN de 2016)

Discontinuité (dans un massif)

Surface qui interrompt la continuité physique du milieu sain. Les discontinuités peuvent être de diverse nature : diaclases, failles, fentes ou fractures d'extension, joints stratigraphiques... (définition issue du Guide INERIS – CEREMA, 2017)

Évaporite

Dépôt riche en chlorures (sel gemme, sylvine, carnallite, etc.) et sulfates (gypse, anhydrite) alcalins, solubles dans l'eau et résultant de l'évaporation de masses d'eau de surface (définition issue du Guide INERIS – CEREMA, 2017)

Foisonnement

Augmentation du volume d'une roche consécutive à sa fragmentation (définition issue du Guide INERIS – CEREMA, 2017)

GTi (réservoir des grès du Trias inférieur)

Le réservoir des grès du Trias inférieur (GTi) en Lorraine et dans les Vosges du Nord est constitué de grès plus ou moins fins, avec quelques passées argileuses dans sa partie supérieure, des passées conglomératiques en son centre et à sa base, et des lentilles d'argile dans sa partie inférieure (issu du site internet SIGES, 2019)

Graben

Structure tectonique constituée par des failles normales de même direction, et limitant des compartiments de plus en plus abaissés en allant vers le milieu de la structure. Elle peut se traduire dans la morphologie par un fossé d'effondrement (ou fossé tectonique). On connaît des grabens de toutes tailles : le fossé rhénan, les Limagnes, en constituent des exemples typiques. Il est à noter que la formation d'un graben exige une extension (ou distension) de la région concernée (d'où des émissions volcaniques fréquentes), ce qui explique leur présence aux premiers stades d'une ouverture océanique (ex : mer rouge) (définition issues du dictionnaire de Géologie de Alain Foucault et Jean-François Raoult - 6^{ème} édition).

Gradient hydraulique

Quotient de la différence de charge hydraulique entre deux points d'un milieu poreux saturé, sur une même ligne de courant, par la distance les séparant sur cette ligne de courant (définition issue du Guide INERIS – CEREMA, 2017)

Horizon

Niveau mince que l'on peut distinguer au sein d'une série sédimentaire, au sein d'un sol... (définition issues du dictionnaire de Géologie de Alain Foucault et Jean-François Raoult - 6^{ème} édition).

Indice de saturation

Nombre sans dimension permettant de déterminer la stabilité d'un matériau soluble dans l'eau. Il indique si l'eau va précipiter, dissoudre ou être en équilibre avec celui-ci (définition issue du Guide INERIS – CEREMA, 2017)

Infiltration

Pénétration de l'eau de surface dans le sol (définition issue du Guide INERIS – CEREMA, 2017)

Intensité du phénomène

Expression d'un phénomène, évaluée ou mesurée par ses paramètres physiques. Pour les inondations, l'intensité est représentée par la hauteur d'eau, la vitesse d'écoulement, la durée de submersion et le transport solide. Ce dernier est important dans l'étude des crues torrentielles et déterminant pour les laves torrentielles. Dans le cas des chutes de blocs, il s'agira plutôt du volume ou de la masse des blocs, de la trajectoire, de l'énergie potentielle ou cinétique, etc. (définition issue du guide PPRN de 2016)

Isophyse

De façon générale, l'adjectif "isohypse" qualifie n'importe quelle surface terrestre ou atmosphérique dont tous les points se trouvent à une même altitude donnée, ou bien toute courbe, toute figure géométrique, etc., dessinée sur une telle surface (définition issue du site internet MétéoFrance, 2019)

Lentille

Masse de terrain se terminant de toute part en biseau. Le dispositif peut avoir une origine tectonique (par laminages multiples) ou une origine sédimentaire. Dans ce dernier cas (couche sédimentaire lenticulaire), il y a généralement lacune de cette couche dans les zones séparant les lentilles. [...] (définition issues du dictionnaire de Géologie de Alain Foucault et Jean-François Raoult - 6^{ème} édition)

Linéament

Alignement structural, long de plusieurs dizaines ou centaines de kilomètres correspondant à un accident de l'écorce terrestre dont l'influence se fait sentir pendant une très longue période de temps, au cours de phases tectoniques successives (définition issues du dictionnaire de Géologie de Alain Foucault et Jean-François Raoult - 6^{ème} édition)

Montée de voute

Éboulement localisé et progressif du toit d'une cavité prenant naturellement la forme d'une voûte (définition issue du Guide INERIS – CEREMA, 2017)

Mur

Terme de mineur désignant la surface intérieure d'une formation, ou bien les terrains situés immédiatement sous elle. Exemple : le mur d'un filon, d'une couche de houille. On parle aussi du mur d'une faille (Définition issues du dictionnaire de Géologie de Alain Foucault et Jean-François Raoult - 6^{ème} édition)

Nappe d'eau souterraine

Les nappes d'eau souterraine ne sont ni des lacs ni des cours d'eau souterrains ; il s'agit d'eau contenue dans les pores ou les fissures des roches saturées par les eaux de pluie qui se sont infiltrées. Dans la zone non saturée, l'eau n'est présente que sous forme d'humidité. Dans la zone saturée, l'eau occupe la totalité des vides disponibles (fissures, pores des sédiments ou des roches) (issu du site internet SIGES, 2019)

NGF

Nivellement général de la France

Niveau piézométrique

Niveau d'eau relevé dans un forage caractérisant la pression de la nappe en un point donné (définition issue du Guide INERIS – CEREMA, 2017)

Pendage

Angle entre une surface (couche, plan de schistosité, contact anormal, etc.) et un plan horizontal ; sa mesure est celle du plongement de la ligne de plus grande pente de cette surface. Le sens (ou direction) du pendage est la direction de cette ligne de plus grande pente, orientée vers le bas. Elle est perpendiculaire à la direction de la surface (qui est l'intersection de celle-ci par un plan horizontal). [...] (définition issues du dictionnaire de Géologie de Alain Foucault et Jean-François Raoult - 6^{ème} édition)

Poreux

Relatif au milieu comportant des vides (définition issue du Guide INERIS – CEREMA, 2017)

PPRN

Plan de prévention des Risques Naturels

Pression hydrostatique

Pression exercée par un fluide sur une surface du fait de sa pesanteur (définition issue du Guide INERIS – CEREMA, 2017)

Puissance

Epaisseur d'une couche ou d'une série de couches mesurée perpendiculairement à la stratification. C'est donc l'épaisseur réelle par opposition à l'épaisseur apparente qui peut être relevée par exemple dans un sondage oblique à la stratification (définition issues du dictionnaire de Géologie de Alain Foucault et Jean-François Raoult - 6^{ème} édition)

Rejet (d'une faille ou d'un décrochement)

Amplitude du déplacement causé par une faille. Le rejet d'une faille peut être considéré comme la somme de trois composantes perpendiculaires : le rejet vertical, le rejet horizontal transversal (perpendiculaire à la direction de la faille), le rejet horizontal longitudinal, ou décrochement (définition issues du dictionnaire de Géologie de Alain Foucault et Jean-François Raoult - 6^{ème} édition)

RTR

Recommandation pour les Terrassements Routiers

Saccharoïde

S'applique aux roches ayant un grain analogue à celui du sucre cristallisé. Exemple : granite saccharoïde à grain de 1 à 2 mm, marbre saccharoïde (définition issue du dictionnaire de Géologie de Alain Foucault et Jean-François Raoult - 6^{ème} édition)

Soluble

Se dit d'un corps solide qui peut se dissoudre dans un liquide en formant un mélange homogène (définition issue du Guide INERIS – CEREMA, 2017)

Taux de dissolution

Vitesse à laquelle un soluté se dissout dans un solvant (définition issue du Guide INERIS – CEREMA, 2017)

Toit

Terme de mineur désignant la surface supérieure d'une formation, ou bien les terrains la surmontant immédiatement. Exemple : le toit d'un filon, d'une couche de houille. On parle aussi du toit d'une faille (définition issues du dictionnaire de Géologie de Alain Foucault et Jean-François Raoult - 6^{ème} édition)

Annexe 2 :

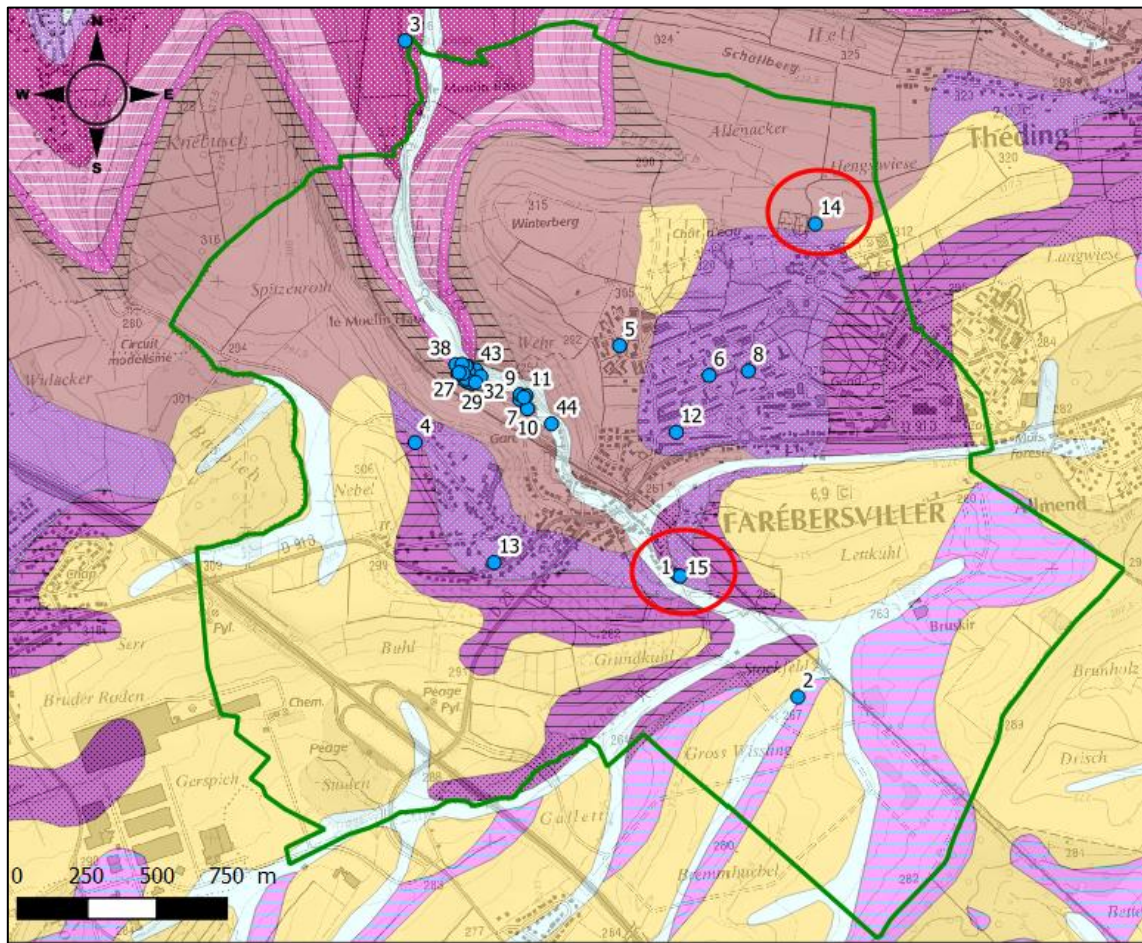
Forages sur la commune de Farebersviller

Identifiant carte	Nom	Entreprise	Date	Z (m)	Nature Ouvrage	Prof. Max (m)
1	C7653	?	1901	257	sondage	600
2	Siviard 198	Internationale Bohrgesellschaft	1901	262	sondage	600.3
3	AEP	?	1954	217.2	forage AEP	177.2
4	RG1	Geoexpert	nov. - déc. 1991	293	Destructif	100.7
5	RG2	Geoexpert	nov. - déc. 1991		carotté	30 ⁸
6	SC1 aval Moulin bas	ANTEA	18/06/1998	223	sondage	
7	SC1 STEP	ANTEA	1998	239	sondage	20
8	SC1 aval STEP	ANTEA	1998	235	sondage	15
9	SD2 STEP	ANTEA	1998	239	sondage	20
10	SD1 STEP	ANTEA	1998	238.5	sondage	36
11	SD3 STEP	ANTEA	1998	239	sondage	36.2
12	Sondage carotté amont moulin bas	ANTEA	1998	222	sondage	
13		DUQUAIT SEBA	28/02/2000	276	sondage	102
14	S1	FONDASOL	28/10/2000	307	sondage destructif jusqu'à 50,3 m / puis carotté	132.4
15	S2	FONDASOL	20/12/2000	257	sondage destructif jusqu'à 51 m / puis carotté	146
16	SP1	FONDASOL	30/04/2001	239.2	Pressiométrique	30
17	SP2	FONDASOL	03/05/2001	239.7	Pressiométrique	30
18	R1	FONDASOL	10/05/2001	234.7	Destructif	30
19	SP4	FONDASOL	14/05/2001	235.3	Pressiométrique	31
20	SP5	FONDASOL	16/05/2001	236.3	Pressiométrique	31
21	R2	FONDASOL	17/05/2001	234.7	Destructif	30.4
22	R3	FONDASOL	18/05/2001	240.2	Destructif	30.4
23	SP3	FONDASOL	18/05/2001	240	Pressiométrique	31
24	SP6	FONDASOL	24/05/2001	234.2	Pressiométrique	31
25	SP11	FONDASOL	05/02/2007	234.9	Pressiométrique	30
26	SP14	FONDASOL	14/03/2007	235	Pressiométrique	10
27	SP8	FONDASOL	14/03/2007	234.7	Pressiométrique	10
28	SP15	FONDASOL	15/03/2007	235.4	Pressiométrique	10
29	SP16	FONDASOL	16/03/2007	235.5	Pressiométrique	10
30	SP18	FONDASOL	19/03/2007	234.8	Pressiométrique	10
31	SP17	FONDASOL	20/03/2007	235.3	Pressiométrique	10
32	SP19	FONDASOL	21/03/2007	239.6	Pressiométrique	14
33	SP20	FONDASOL	17/04/2007	234.9	Pressiométrique	32
34	D1	FONDASOL	18/04/2007	235.1	Destructif	32
35	D4	FONDASOL	18/04/2007	234.6	Destructif	32
36	D3	FONDASOL	19/04/2007	235.5	Destructif	32
37	D2	FONDASOL	23/04/2007	234.1	Destructif	32
38	SP22	FONDASOL	06/09/2007	234.6	Pressiométrique	40
39	SP21	FONDASOL	11/09/2007	238.5	Pressiométrique	32
40	SP23	FONDASOL	18/09/2007	234.7	Pressiométrique	32
41	SP24	FONDASOL	19/09/2007	234.7	Pressiométrique	32
42	SP25	FONDASOL	20/09/2007	234.7	Pressiométrique	30
43	SP26	FONDASOL	21/09/2007	234.7	Pressiométrique	26
44		?	?	254	sondage	18

Illustration 28 – Forages sur la commune de Farebersviller

⁸ Il y a probablement une erreur de profondeur sur le forage RG2 (rue Zola) qui est noté à 30 m de profondeur dans le rapport BRGM de 1992 mais qui recoupe les couches grises à 60 m de profondeur.

La localisation des forages est donnée ci-dessous :



*Illustration 29 – Localisation des forages sur la commune de Farébersviller –
les forages entourés en rouge correspondent aux forages de FONDASOL en 2000 ayant recoupé la
couche de sel (forages 14 et 15)*

Annexe 3 :

Données de géophysiques électriques

EQUIPEMENT

L'acquisition des panneaux électriques a été réalisée à l'aide d'un résistivimètre Syscal-Pro (Iris Instruments, France) connecté à 12 flûtes de 8 électrodes, soit 96 électrodes métalliques régulièrement espacées de 10 mètres sur 950 m. L'énergie provenait d'une batterie externe. L'espacement inter-électrodes de 10 m a été choisi afin d'assurer à la fois une résolution acceptable des terrains de surface, et l'obtention d'une profondeur d'investigation maximale d'environ 150 m (profondeur contractuelle).

PRINCIPE DE LA METHODE DE RESISTIVITE

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 en surface. Les termes « panneau électrique » ou « tomographie électrique » sont utilisés pour qualifier une prospection électrique (initialement basée sur quatre électrodes) automatisée le long d'un profil multi-électrodes (2D) ou sur une surface (3D). Ce type d'acquisition présente l'avantage de fournir des résultats fiables en 2D ou 3D, et d'être rapidement mis en œuvre.

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.

A 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.

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.

DISPOSITIFS D'ELECTRODES / CONFIGURATIONS D'ACQUISITION

Une configuration d'acquisition est une manière d'agencer géométriquement les électrodes de courant (AB) et de potentiel (MN) (soit les quadripôles ABMN) en surface. Il en existe plusieurs, chacune présentant avantages et inconvénients. 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 multi-voies (plusieurs mesures de ΔV pour une injection de courant).

D'une manière générale, la mise en œuvre d'au moins deux configurations d'électrodes permet dans la plupart des contextes de mieux appréhender la géométrie des différents corps en présence.

Une configuration d'acquisition est une manière d'agencer géométriquement les électrodes de courant et de potentiel en surface. Il en existe plusieurs, chacune présentant des avantages et des inconvénients, notamment en ce qui concerne l'amplitude du signal, la profondeur d'investigation et la résolution.

Le dispositif dipôle-dipôle donne une très bonne résolution des terrains de sub-surface et pour les discontinuités verticales. Il est moins sensible aux effets latéraux (structures parallèles au profil, ravines ou crêtes parallèles au profil). Par contre, le rapport signal/bruit décroît rapidement et la profondeur d'investigation est moins importante.

Le dispositif Wenner-Schlumberger est beaucoup plus intégrant et, de ce fait, plus sensible aux effets latéraux. La résolution au niveau des horizons de sub-surface est moins bonne et celle des structures plus globale. Son intérêt majeur est la profondeur d'investigation atteinte (de l'ordre de 150 m pour un dispositif de 950 m de long) grâce à un meilleur rapport signal/bruit.

POSITIONNEMENT DES MESURES

Les tomographies de résistivité ont été positionnées (coordonnées X, Y dans le système Lambert 93) avec un GPS Trimble GeoXH 6000 associé à une antenne externe de type Tornado. Ce récepteur permet de capter les satellites GPS ainsi que les satellites GLONASS (en moyenne entre 14 et 20 satellites). Les valeurs obtenues sont corrigées en post-traitement, à l'aide des éphémérides de l'IGN. Ce post-traitement permet d'aboutir à une précision en X, Y de l'ordre de 10 cm (dans les conditions optimales d'utilisation).

La précision sur les levés altimétriques (Z) est fonction de la couverture végétale et du relief. Les valeurs de Z qui sont affectées d'une précision anormalement élevée et qui paraissent aberrantes (par rapport au MNT et par rapport aux observations de terrain) ont été rejetées et ne sont donc pas prises en compte dans la construction du profil topographique. La précision finale sur Z est de l'ordre de quelques dizaines de centimètres en absolu.

CONSTRUCTION D'UNE PSEUDO-SECTION DE RESISTIVITE APPARENTE

Après filtrage des données brutes de résistivité apparente (mesurées sur le terrain) sur la base de critère de qualité, de courant émis ou de potentiel mesuré (logiciels Iris Instruments et X2ipi), celles-ci sont agencées de manière à obtenir une coupe (pseudo-section) de résistivité apparente du sous-sol. Cette dernière est construite (automatiquement) en reportant la valeur de la résistivité apparente mesurée au centre du dispositif et à une profondeur dépendant de l'écartement entre les électrodes. Cette représentation conduit à une image pour laquelle les valeurs de résistivité (puisqu'apparentes) et celles de profondeur ne sont pas correctes.

Filtrage des mesures avec le logiciel PROSYS

Les données brutes de mesures électriques ont été filtrées avec le protocole suivant :

- pour le dipôle-dipôle :
 - ❖ $V > 0.2 \text{ mV}$, (V = potentiel mesuré)
 - ❖ $Q < 5 \%$, (Q = facteur qualité, erreur de répétitivité pendant la phase de stack)
- pour le Wenner-Schlumberger (dont le signal est plus puissant) :
 - ❖ $V > 0.5 \text{ mV}$,
 - ❖ $Q < 5 \%$.

Traitement des mesures avec le logiciel X2IPI

Le logiciel X2IPI (Bobachev) permet d'atténuer les artéfacts dus aux à-coups de prise suivant une procédure explicitée selon les étapes suivantes :

- édition de la pseudo-coupe de résistivité apparente ;
- élimination des mesures aberrantes, filtrage des à-coups de prise, filtrages médian ;
- édition de la pseudo-coupe de résistivité apparente après filtrages.

TRAITEMENT ET INVERSION DES DONNEES

Afin d'obtenir une image quantitative représentant les variations de résistivité réelle (et non apparente) en fonction de la vraie profondeur, il est nécessaire d'inverser la pseudo-section. Cette étape est réalisée à l'aide du logiciel Res2DInv (Loke & Barker). 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. 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. Afin de prendre en compte les morphologies rencontrées, la topographie de chaque profil est incluse lors de l'inversion.

L'erreur (RMS) constitue la différence entre les deux premières pseudo-sections

La section de résistivité « vraie », 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 présentant la distribution des résistivités calculées le long du profil en fonction de la profondeur et cela pour les différentes configurations d'acquisition choisies.

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).

Pour chaque dispositif, des paramètres d'inversion ont été testés de manière à obtenir une bonne convergence de la solution et une erreur minimale d'ajustement du modèle aux mesures. Les résultats de ces tests ont permis de sélectionner 2 ensembles de paramètres qui sont :

- robuste horizontalisé (ROBH) : minimisation de l'erreur en valeur absolue, limites plus franches entre les différents horizons, adaptée aux milieux contrastés, facteur d'anisotropie de 0,3 ;
- standard horizontalisé (STDH) : minimisation de l'erreur quadratique, inversion lissée. Associée à un facteur d'anisotropie de 0,3, cette inversion permet de privilégier les structures horizontales et la continuité des horizons géoélectriques.

Annexe 4 :

Données de géophysiques sismiques

Equipement

L'acquisition du profil sismique réflexion de 930 m de long a été réalisée à l'aide d'une centrale d'acquisition sismique Stratavizor 48 traces et 5 Geodes 24 traces (Geometrics, USA) connectées à 7 flûtes de 24 traces, soit 168 traces régulièrement espacées de 5 mètres sur 835 m. La source sismique était de type chute de poids accélérée A200P. Au total 93 points de tirs sismique ont été réalisés avec un espacement de 10 m. Le matériel utilisé comprend :

- 1 Stratavizor NZ 48 traces Geometrics
- 5 Geode 24 traces Geometrics
- 7 flûtes sismiques d'inter-trace 5 m
- 180 géophones de fréquence centrale 10 Hz
- 1 source sismique chute de poids accélérée
- 2 claies de portages
- 7 batteries de voiture 110 Ah
- 1 GPS différentiel Trimble
- 1 micro-ordinateur portable
- 2 véhicules

Principe de la méthode

La sismique réflexion est une technique de mesure indirecte qui consiste à enregistrer en surface des échos issus de la propagation dans le sous-sol d'une onde sismique provoquée. Ces échos sont générés par les hétérogénéités du sous-sol (contraste d'impédance entre deux formations géologiques). Le passage par exemple d'une couche d'argile à une couche de sable dans une colonne sédimentaire va se traduire par la présence d'un réflecteur sur les enregistrements. Le temps d'arrivée de la réflexion permet de situer la position de cette transition dans l'espace ; l'amplitude de l'écho apporte des informations sur certains paramètres physiques des milieux en contact. En sismique réflexion, l'enregistreur sismique fournit les temps de propagation des ondes sismiques entre le point d'impact et les divers capteurs (géophones) du profil.

La prospection sismique a pour base l'étude de ce temps de propagation. Connaissant la distance qui sépare le point d'impact des capteurs, on construit un diagramme temps-distance. Les temps sont en ordonnée et les distances en abscisse. Cette méthode est une étape de base qui permet, d'identifier les différents types d'ondes et les réflexions visibles sur les enregistrements pour mettre en place une séquence de traitement adéquate.

En résumé, les études sismiques fournissent une image de la structure du sous-sol, et dans certains cas des informations sur sa nature.

Traitement des données de sismique réflexion

Le traitement de sismique réflexion a pour but l'amélioration du rapport signal/bruit et la mise en forme de l'information pour faciliter l'interprétation.

Les données brutes enregistrées sur le terrain sont converties 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.

Il n'existe pas de protocole de traitement universel. Celui-ci doit être adapté en fonction du matériel utilisé, de la source utilisée, du dispositif d'acquisition, du contexte géologique et des objectifs recherchés. De nombreux essais sont nécessaires pour chaque phase de traitement.

Un exemple de séquence de traitement est présenté ci-après.

Séquences de traitement	Descriptif de l'opération
Édition 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.
Correction des amplitudes	Même en milieu homogène et élastique, le mouvement des particules s'atténue au cours de la propagation à cause de l'expansion des fronts d'ondes. C'est l'atténuation géométrique ou atténuation par divergence qu'il faut donc corriger.
Mise à jour de la géométrie	Cette séquence permet d'implémenter les positions de la source et des récepteurs dans les headers des fichiers de données sismiques.
Corrections statiques	Il s'agit des corrections de topographie ou de différence de temps de déclenchement de l'enregistrement.
Filtrage fréquentiel	Il permet de filtrer des fréquences "inutiles" dans la bande fréquentielle du tir sismique
Mise en collection de point milieux communs	Le point milieu est le point situé au milieu du segment source-récepteur et correspond à l'endroit où l'onde réfléchie enregistrée sur le tir sismique, rebondit à l'interface entre deux couches géologiques.
Correction dynamiques (NMO)	Les corrections dynamiques consistent à « horizontaliser » les hyperboles de réflexion sur les CMP afin de pouvoir effectuer la sommation à temps constant
Sommation en points milieux communs (stack)	Cette étape permet d'additionner l'énergie des différentes traces d'un même CMP pour faire ressortir la cible. La collection CMP devient donc une trace sommée
Migration temps	Cette opération permet de positionner les réflexions observées sur la coupe somme dans la position des réflecteurs qui leur ont donné naissance. Sur une coupe somme, on suppose que la source est confondue avec le récepteur
Conversion temps profondeur	Cette opération permet de convertir la coupe somme en temps en une coupe sommes en profondeur à partir de la vitesse des ondes sismiques dans le milieu

Illustration 30 – Exemple de sequence de traitement

Annexe 5 :

Paramètres d'inversion pour Res2DInv

STDH

Inversion settings

Initial damping factor (0.01 to 1.00)

0.1000

Minimum damping factor (0.001 to 0.75)

0.0200

Local optimization option (0=No, 1=Yes)

1

Convergence limit for relative change in RMS error in percent (0.1 to 20)

1.0000

Minimum change in RMS error for line search in percent (0.5 to 100)

0.5000

Number of iterations (1 to 30)

7

Vertical to horizontal flatness filter ratio (0.25 to 4.0)

0.3000

Model for increase in thickness of layers(0=default 10%, 1=default 25%, 2=user defined)

2

Number of nodes between adjacent electrodes (1, 2 or 4)

2

Flatness filter type, Include smoothing of model resistivity (0=model changes only,1=directly on model)

1

Reduce number of topographical data points? (0=No,1=Yes. Recommend leave at 0)

0

Carry out topography modeling? (0=No,1=Yes)

1

Type of topography trend removal (0=Average,1=Least-squares,2=End to end)

1

Type of Jacobian matrix calculation (0=Quasi-Newton, 1=Gauss-Newton, 2=Mixed)

1

Increase of damping factor with depth (1.0 to 2.0)

1.2000

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

Robust data constrain? (0=No, 1=Yes)

0

Cutoff factor for data constrain (0.0001 to 0.1))

0.0100

Robust model constrain? (0=No, 1=Yes)

0

Cutoff factor for model constrain (0.0001 to 1.0)

0.0020

Allow number of model parameters to exceed data points? (0=No, 1=Yes)

1

Use extended model? (0=No, 1=Yes)

0

Reduce effect of side blocks? (0=No, 1=Slight, 2=Severe, 3=Very Severe)

3

Type of mesh (0=Normal,1=Fine,2=Finest)

```

2
Optimise damping factor? (0=No, 1=Yes)
1
Time-lapse inversion constrain (0=None,1&2=Smooth,3=Robust)
0
Type of time-lapse inversion method (0=Simultaneous,1=Sequential)
0
Thickness of first layer (0.25 to 1.0)
0.5000
Factor to increase thickness layer with depth (1.0 to 1.25)
1.1000
USE FINITE ELEMENT METHOD (YES=1,NO=0)
1
WIDTH OF BLOCKS (1=NORMAL WIDTH, 2=DOUBLE, 3=TRIPLE, 4=QUADRAPLE,
5=QUINTIPLE)
1
MAKE SURE BLOCKS HAVE THE SAME WIDTH (YES=1,NO=0)
1
RMS CONVERGENCE LIMIT (IN PERCENT)
1.000
USE LOGARITHM OF APPARENT RESISTIVITY (0=USE LOG OF APPARENT RESISTIVITY,
1=USE RESISTANCE VALUES, 2=USE APPARENT RESISTIVITY)
0
TYPE OF IP INVERSION METHOD (0=CONCURRENT,1=SEQUENTIAL)
1
PROCEED AUTOMATICALLY FOR SEQUENTIAL METHOD (1=YES,0=NO)
1
IP DAMPING FACTOR (0.01 to 1.0)
0.150
USE AUTOMATIC IP DAMPING FACTOR (YES=1,NO=0)
0
CUTOFF FACTOR FOR BOREHOLE DATA (0.0005 to 0.02)
0.00100
TYPE OF CROSS-BOREHOLE MODEL (0=normal,1=halfsize)
0
LIMIT RESISTIVITY VALUES (0=No,1=Yes)
1
Upper limit factor (10-50)
20.000
Lower limit factor (0.02 to 0.1)
0.050
Type of reference resistivity (0=average,1=first iteration)
0
Model refinement (1.0=Normal,0.5=Half-width cells)
0.50
Combined Combined Marquardt and Occam inversion (0=Not used,1=used)
0
Type of optimisation method (0=Gauss-Newton,2=Incomplete GN)
2
Convergence limit for Incomplete Gauss-Newton method (0.005 to 0.05)
0.010
Use data compression with Incomplete Gauss-Newton (0=No,1=Yes)
0
Use reference model in inversion (0=No,1=Yes)
0
Damping factor for reference model (0.0 to 0.3)

```



```

0.05000
Use fast method to calculate Jacobian matrix. (0=No,1=Yes)
1
Use higher damping for first layer? (0=No,1=Yes)
1
Extra damping factor for first layer (1.0 to 100.0)
2.50000
Type of finite-element method (0=Triangular,1=Trapezoidal elements)
1
Factor to increase model depth range (1.0 to 5.0)
1.000
Reduce model variations near borehole (0=No, 1=Yes)
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)
0
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)
1
Automatically switch electrodes for negative geometric factor (0=No,
1=Yes)
1
Force resistance value to be consistant 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)
0
Use active constraint balancing (0=No,1=Yes)
0
Type of active constraints (0=Normal,1=Reverse)
0
Lower damping factor limit for active constraints
5.0000
Upper damping factor limit for active constraints
8.0000
Water resistivity variation damping factor
4.0000
Use automatic calculation for change of damping factor with depth
(0=No,1=Yes)
0
Type of I.P. model transformation (0=None, 1=square root, 3=range)
1
Model Chargeability Lower Limit (mV/V) for range
0.00

```

Model Chargeability Upper Limit (mV/V) for range
900.00
Use I.P. model refinement (0=No, 1=Yes)
1
Weight for I.P. data (1 to 10)
1.00
I.P. model damping factor (0.05 to 1.0)
0.15
Use program estimate for I.P. model damping factor (0=No, 1=Yes)
0
Type of I.P. smoothness constraint (1=Same as resistivity, 0=Different)
1
Joint or separate I.P. inversion method (1=Separate, 0=Joint)
1
Apparent I.P. cutoff value (300 to 899 mV/V)
899.00
Use diagonal filter (0=No, 1=Yes)
0
Diagonal filter weight (0.2 to 5.0)
1.00
Limit range of data weights from error estimates? (0=No, 1=Yes)
0
Lower limit of data weights (0.2 to 0.5)
0.30
Upper limit of data weights (2.0 to 5.0)
3.00
Use same data weights from error estimates for different time series?
(0=No, 1=Yes)
0
Calculate model resolution? (0=No, 1=Yes)
0
Use L curve method? (0=No, 1=Yes)
0
Use same norms in L curve method? (0=No, 1=Yes)
0
Allow damping factor in increase in L curve method? (0=No, 1=Yes)
1
Type of borehole damping method (0=Horizontal distance from nearest
borehole, 1=Distance from nearest active electrode)
0
Use fast Jacobian calculation for dense data sets? (0=No,1=Yes)
0
Use higher damping factors at sides of model? (0=No,1=Yes)
1
Adjust damping factors for distances between the blocks in the model?
(0=No,1=Yes)
1
Number of electrodes in segment for sparse inversion method for very long
survey lines.
250
Time-lapse damping factor.
0.25
Reduce time-lapse damping with each iteration? (0=No,1=Yes)
1

ROBH

Inversion settings

Initial damping factor (0.01 to 1.00)

0.1000

Minimum damping factor (0.001 to 0.75)

0.0200

Local optimization option (0=No, 1=Yes)

1

Convergence limit for relative change in RMS error in percent (0.1 to 20)

1.0000

Minimum change in RMS error for line search in percent (0.5 to 100)

0.5000

Number of iterations (1 to 30)

7

Vertical to horizontal flatness filter ratio (0.25 to 4.0)

0.3000

Model for increase in thickness of layers (0=default 10%, 1=default 25%, 2=user defined)

2

Number of nodes between adjacent electrodes (1, 2 or 4)

2

Flatness filter type, Include smoothing of model resistivity (0=model changes only, 1=directly on model)

1

Reduce number of topographical data points? (0=No, 1=Yes. Recommend leave at 0)

0

Carry out topography modeling? (0=No, 1=Yes)

1

Type of topography trend removal (0=Average, 1=Least-squares, 2=End to end)

1

Type of Jacobian matrix calculation (0=Quasi-Newton, 1=Gauss-Newton, 2=Mixed)

1

Increase of damping factor with depth (1.0 to 2.0)

1.2000

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

Robust data constrain? (0=No, 1=Yes)

1

Cutoff factor for data constrain (0.0001 to 0.1)

0.0100

Robust model constrain? (0=No, 1=Yes)

1

Cutoff factor for model constrain (0.0001 to 1.0)

0.0020

Allow number of model parameters to exceed data points? (0=No, 1=Yes)

1

Use extended model? (0=No, 1=Yes)

0

Reduce effect of side blocks? (0=No, 1=Slight, 2=Severe, 3=Very Severe)

3

Type of mesh (0=Normal, 1=Fine, 2=Finest)

```

2
Optimise damping factor? (0=No, 1=Yes)
1
Time-lapse inversion constrain (0=None,1&2=Smooth,3=Robust)
0
Type of time-lapse inversion method (0=Simultaneous,1=Sequential)
0
Thickness of first layer (0.25 to 1.0)
0.5000
Factor to increase thickness layer with depth (1.0 to 1.25)
1.1000
USE FINITE ELEMENT METHOD (YES=1,NO=0)
1
WIDTH OF BLOCKS (1=NORMAL WIDTH, 2=DOUBLE, 3=TRIPLE, 4=QUADRAPLE,
5=QUINTIPLE)
1
MAKE SURE BLOCKS HAVE THE SAME WIDTH (YES=1,NO=0)
1
RMS CONVERGENCE LIMIT (IN PERCENT)
1.000
USE LOGARITHM OF APPARENT RESISTIVITY (0=USE LOG OF APPARENT RESISTIVITY,
1=USE RESISTANCE VALUES, 2=USE APPARENT RESISTIVITY)
0
TYPE OF IP INVERSION METHOD (0=CONCURRENT,1=SEQUENTIAL)
1
PROCEED AUTOMATICALLY FOR SEQUENTIAL METHOD (1=YES,0=NO)
1
IP DAMPING FACTOR (0.01 to 1.0)
0.150
USE AUTOMATIC IP DAMPING FACTOR (YES=1,NO=0)
0
CUTOFF FACTOR FOR BOREHOLE DATA (0.0005 to 0.02)
0.00100
TYPE OF CROSS-BOREHOLE MODEL (0=normal,1=halfsize)
0
LIMIT RESISTIVITY VALUES (0=No,1=Yes)
1
Upper limit factor (10-50)
20.000
Lower limit factor (0.02 to 0.1)
0.050
Type of reference resistivity (0=average,1=first iteration)
0
Model refinement (1.0=Normal,0.5=Half-width cells)
0.50
Combined Combined Marquardt and Occam inversion (0=Not used,1=used)
0
Type of optimisation method (0=Gauss-Newton,2=Incomplete GN)
2
Convergence limit for Incomplete Gauss-Newton method (0.005 to 0.05)
0.010
Use data compression with Incomplete Gauss-Newton (0=No,1=Yes)
0
Use reference model in inversion (0=No,1=Yes)
0
Damping factor for reference model (0.0 to 0.3)

```

```

0.05000
Use fast method to calculate Jacobian matrix. (0=No,1=Yes)
1
Use higher damping for first layer? (0=No,1=Yes)
1
Extra damping factor for first layer (1.0 to 100.0)
2.50000
Type of finite-element method (0=Triangular,1=Trapezoidal elements)
1
Factor to increase model depth range (1.0 to 5.0)
1.000
Reduce model variations near borehole (0=No, 1=Yes)
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)
0
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)
1
Automatically switch electrodes for negative geometric factor (0=No,
1=Yes)
1
Force resistance value to be consistant 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)
0
Use active constraint balancing (0=No,1=Yes)
0
Type of active constraints (0=Normal,1=Reverse)
0
Lower damping factor limit for active constraints
5.0000
Upper damping factor limit for active constraints
8.0000
Water resistivity variation damping factor
4.0000
Use automatic calculation for change of damping factor with depth
(0=No,1=Yes)
0
Type of I.P. model transformation (0=None, 1=square root, 3=range)
1
Model Chargeability Lower Limit (mV/V) for range
0.00

```

Model Chargeability Upper Limit (mV/V) for range
900.00
Use I.P. model refinement (0=No, 1=Yes)
1
Weight for I.P. data (1 to 10)
1.00
I.P. model damping factor (0.05 to 1.0)
0.15
Use program estimate for I.P. model damping factor (0=No, 1=Yes)
0
Type of I.P. smoothness constraint (1=Same as resistivity, 0=Different)
1
Joint or separate I.P. inversion method (1=Separate, 0=Joint)
1
Apparent I.P. cutoff value (300 to 899 mV/V)
899.00
Use diagonal filter (0=No, 1=Yes)
0
Diagonal filter weight (0.2 to 5.0)
1.00
Limit range of data weights from error estimates? (0=No, 1=Yes)
0
Lower limit of data weights (0.2 to 0.5)
0.30
Upper limit of data weights (2.0 to 5.0)
3.00
Use same data weights from error estimates for different time series?
(0=No, 1=Yes)
0
Calculate model resolution? (0=No, 1=Yes)
0
Use L curve method? (0=No, 1=Yes)
0
Use same norms in L curve method? (0=No, 1=Yes)
0
Allow damping factor in increase in L curve method? (0=No, 1=Yes)
1
Type of borehole damping method (0=Horizontal distance from nearest
borehole, 1=Distance from nearest active electrode)
0
Use fast Jacobian calculation for dense data sets? (0=No,1=Yes)
0
Use higher damping factors at sides of model? (0=No,1=Yes)
1
Adjust damping factors for distances between the blocks in the model?
(0=No,1=Yes)
1
Number of electrodes in segment for sparse inversion method for very long
survey lines.
250
Time-lapse damping factor.
0.25
Reduce time-lapse damping with each iteration? (0=No,1=Yes)
1

Annexe 6 :

Présentation des coupes de résistivité inversées

Les illustrations suivantes présentant les résultats des inversions des données de résistivité apparente mesurée sur le terrain :

- la première illustration (celle du haut) montre les résultats de l'inversion des données acquises et inversées avec des paramètres robustes associés à un facteur d'anisotropie (0.3) permettant de privilégier les structures horizontales et la continuité des horizons géoélectriques. Ce type d'inversion donne des limites plus franches entre les différents horizons géoélectriques que les inversions standards. Figurent également sur cette première illustration, les interprétations en termes de géologie et de structure :
 - F pour les failles avec un numéro d'identification ;
 - projection des sondages situés à proximité à des fins de calage de l'interprétation ;
 - interfaces entre les différents horizons géo-électriques (traits continus noirs) ;
 - position théorique du toit de l'horizon de sel (trait bleu ou blanc) ;
 - rappel des informations issues de la carte géologique ;
 - interprétation en termes de présence et d'évolution des phénomènes de dissolution.
- la deuxième illustration (celle du bas) montre les résultats de l'inversion des données acquises et inversées avec des paramètres standards associés à un facteur d'anisotropie (0.3) permettant de privilégier les structures horizontales et la continuité des horizons géoélectriques. Les limites entre les différents horizons géo-électrique sont moins franches mais la visualisation de la signature des failles est meilleure. Les informations reportées sur cette coupe sont les mêmes que celles de la coupe ci-dessus.
- d'une manière générale, les terrains rencontrés sur le secteur d'étude sont globalement des terrains conducteurs (résistivité inférieure à 500 ohm.m) par rapport à la gamme générale des résistivités des formations du sous-sol (0.1 à 10 000 ohm.m). Compte tenu de la gamme de résistivité rencontrée sur la zone d'étude, la catégorisation sera la suivante :
 - terrains résistants (violet, rouge à jaune), résistivité comprise entre 60 et 350 ohm.m ;
 - terrains conducteurs (vert, bleu), résistivité comprise entre 5 et 50 ohm.m.
- la légende lithologique des sondages interprétés sur les coupes de résistivité est la suivante :

	Lettenkohle - t6
	Couches à Cératites - t5b
	Couches à Entroques - t5a
	Couches blanches et couches grises - t4b
	Vide
	Gypse/anhydrite
	Sel
	Couches rouges - t4a
	Muschelkalk inférieur - t3

Illustration 31 – Légende des sondages sur les coupes de résistivité

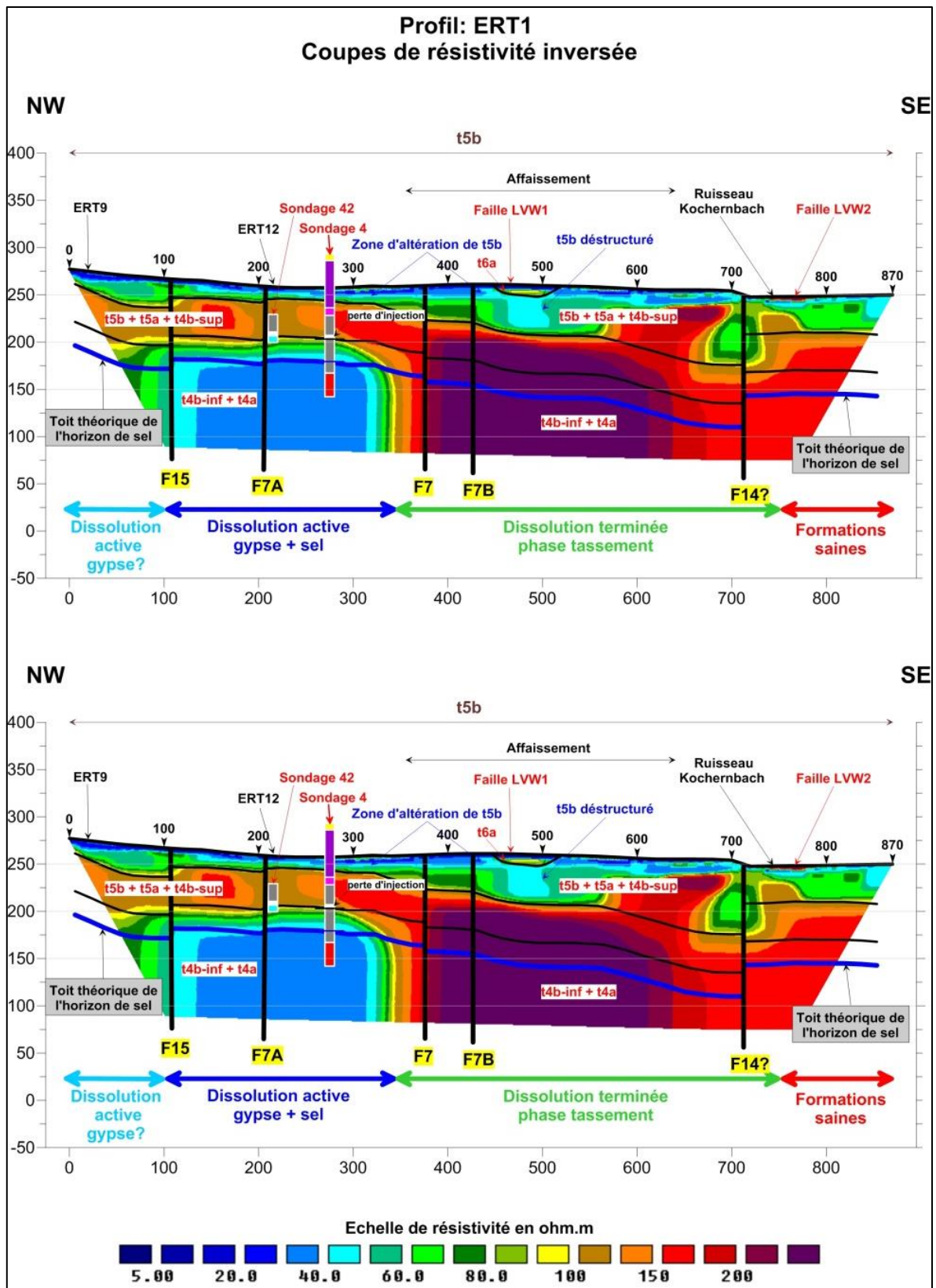


Illustration 32 - ERT1 – Coupes de résistivité inversée interprétées en termes de géologie et de stade de dissolution

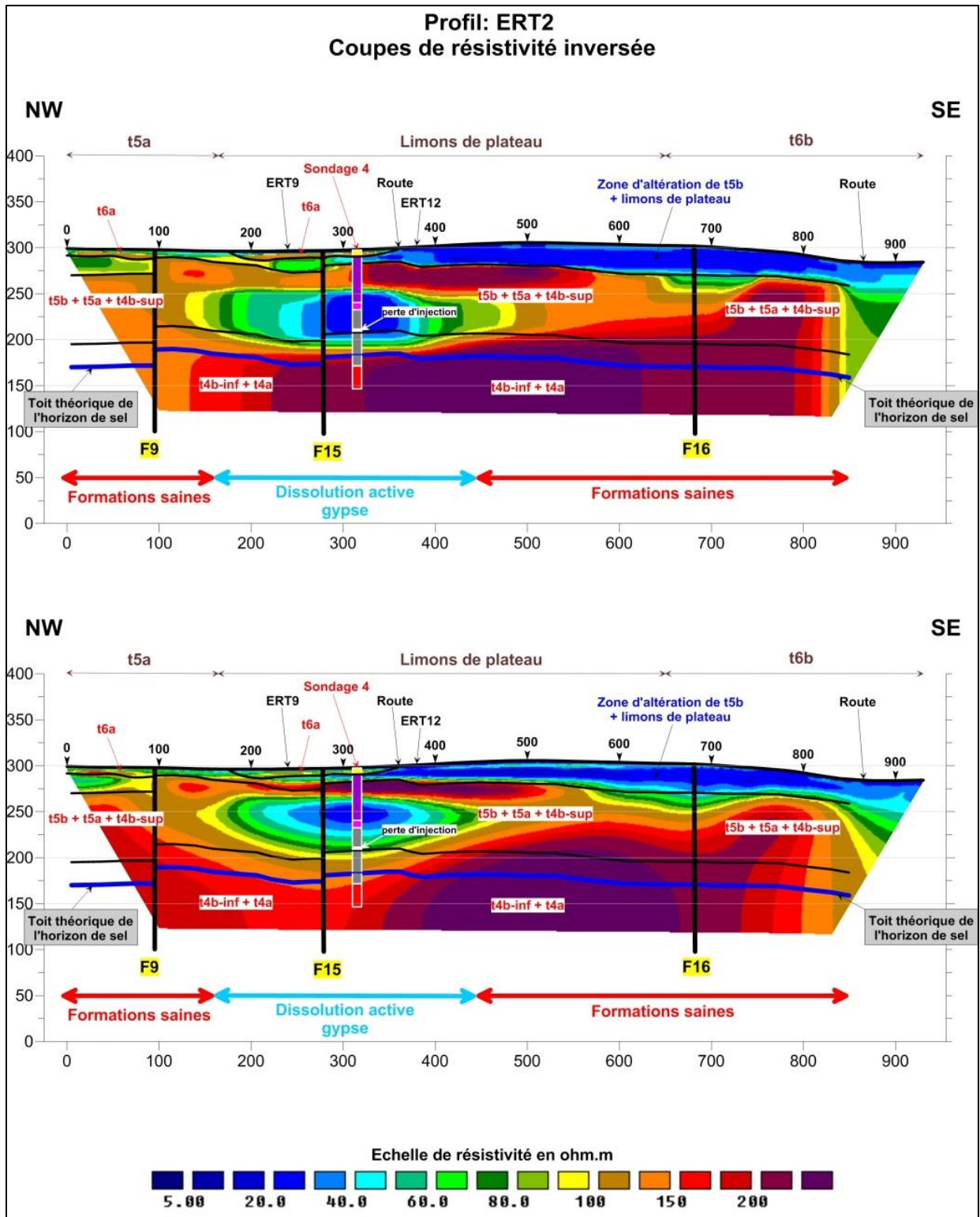
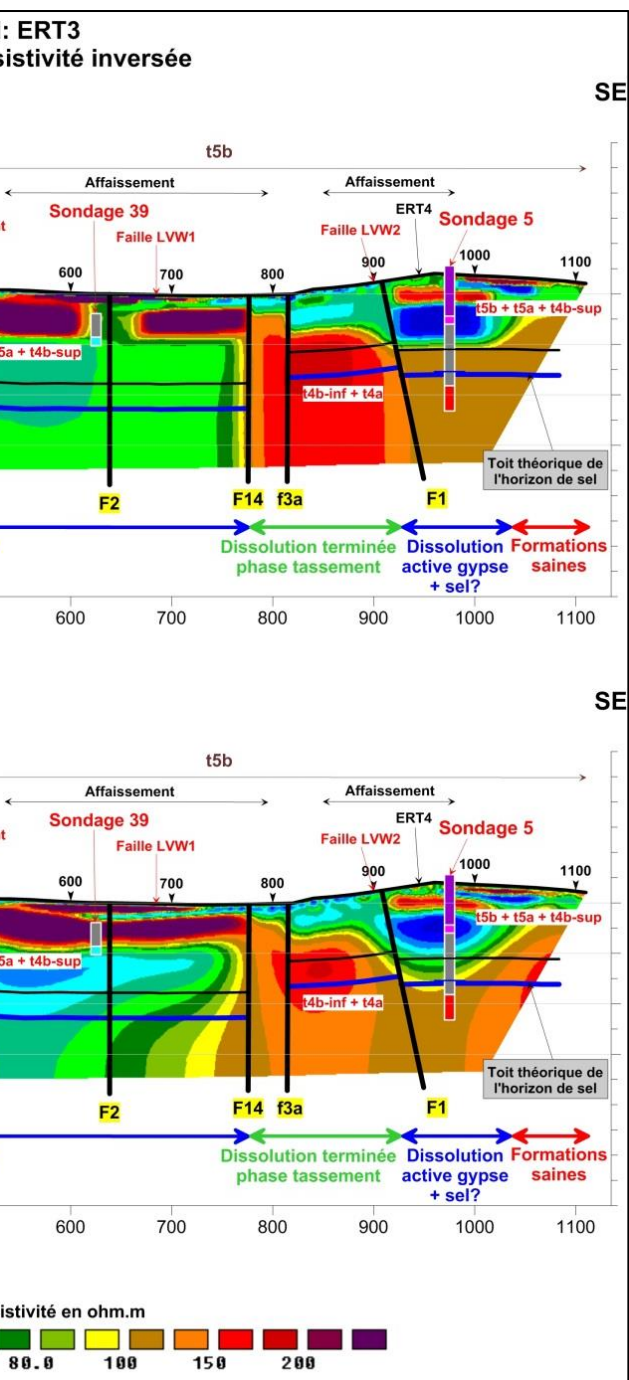


Illustration 33 - ERT2 – Coupes de résistivité inversée interprétées en termes de géologie et de stade de dissolution.

sée interprétées en termes de géologie et de stade
olution

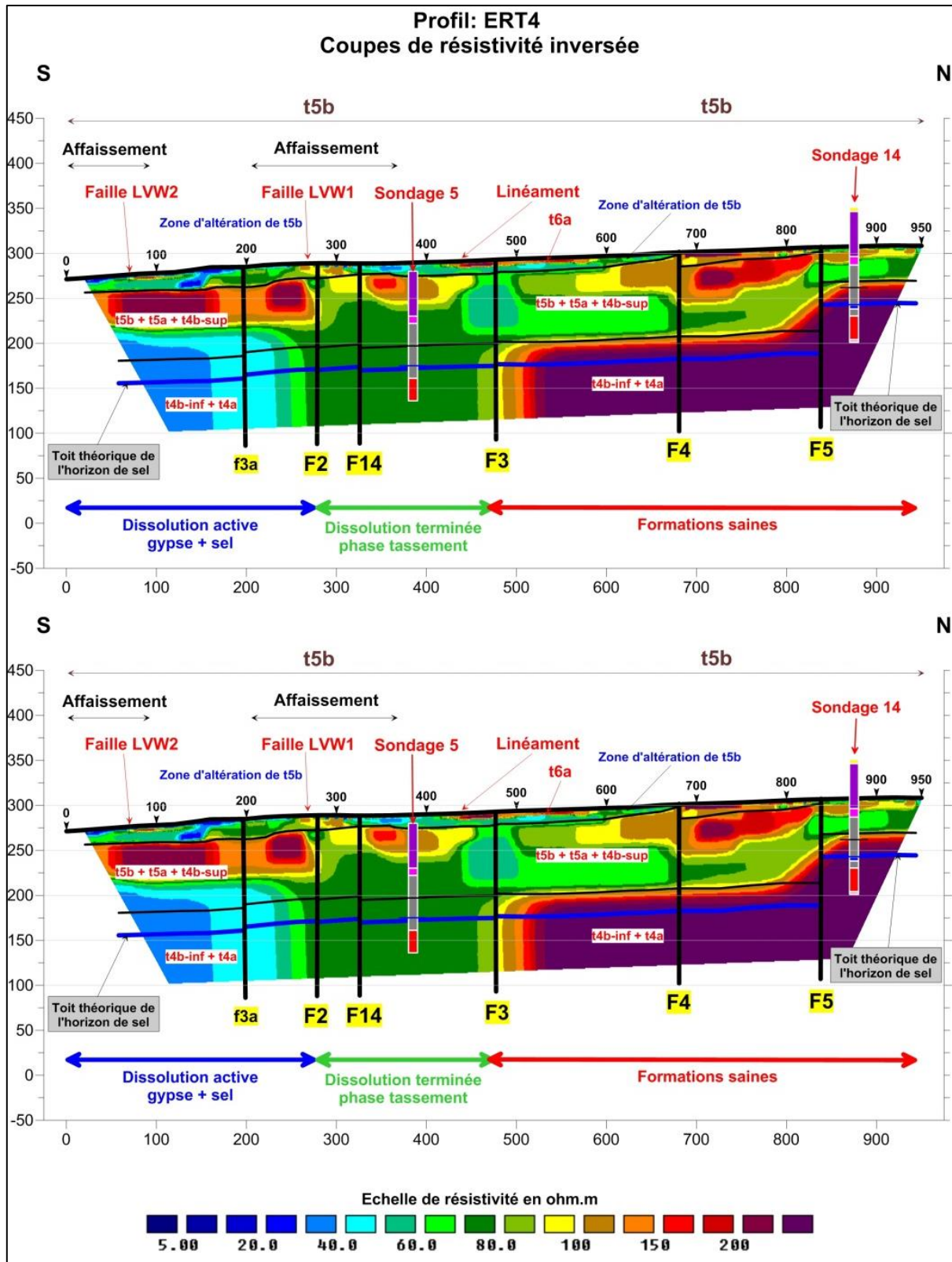


Illustration 35 - ERT4 – Coupes de résistivité inversée interprétées en termes de géologie et de stade de dissolution

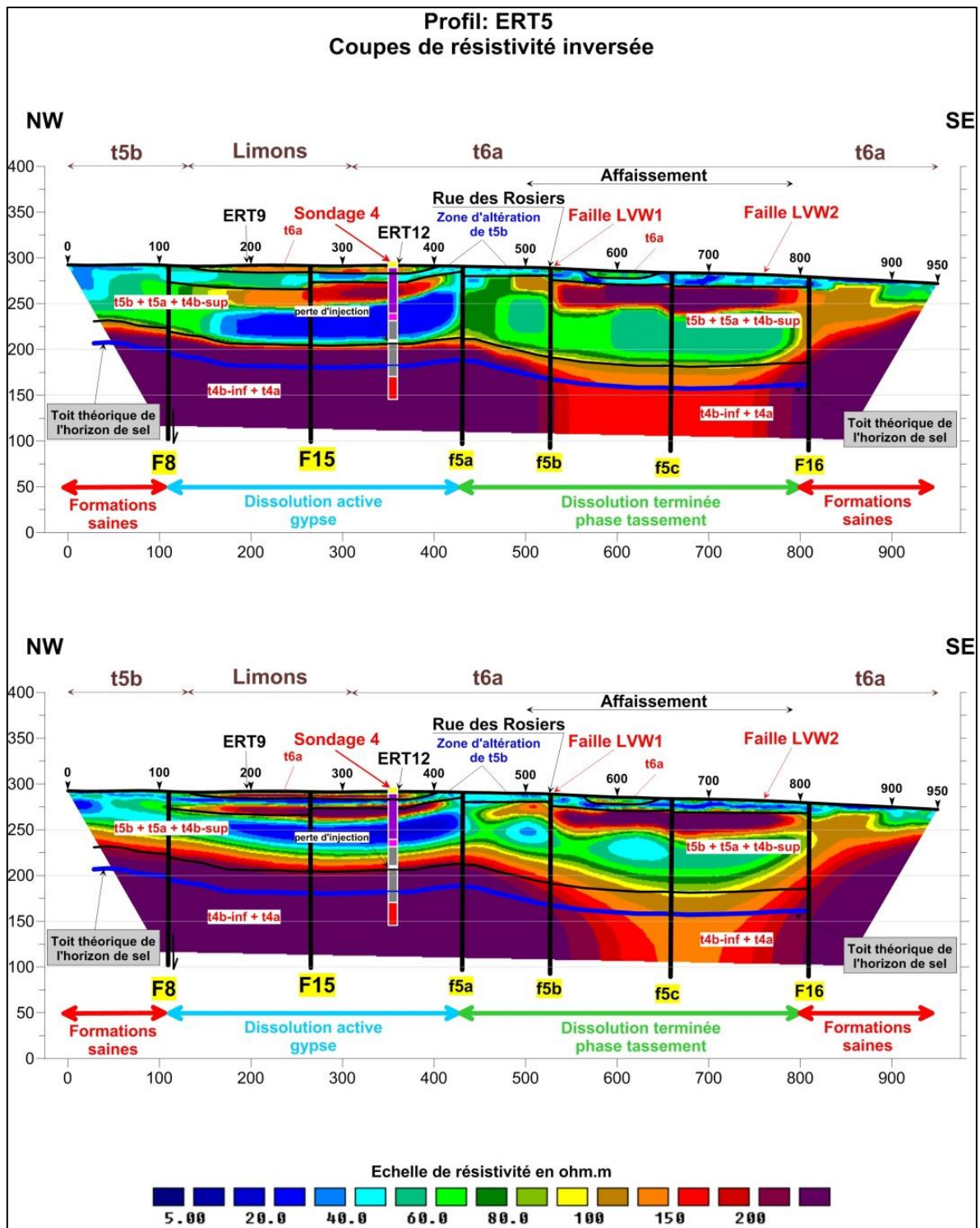


Illustration 36 - ERT5 – Coupes de résistivité inversée interprétées en termes de géologie et de stade de dissolution

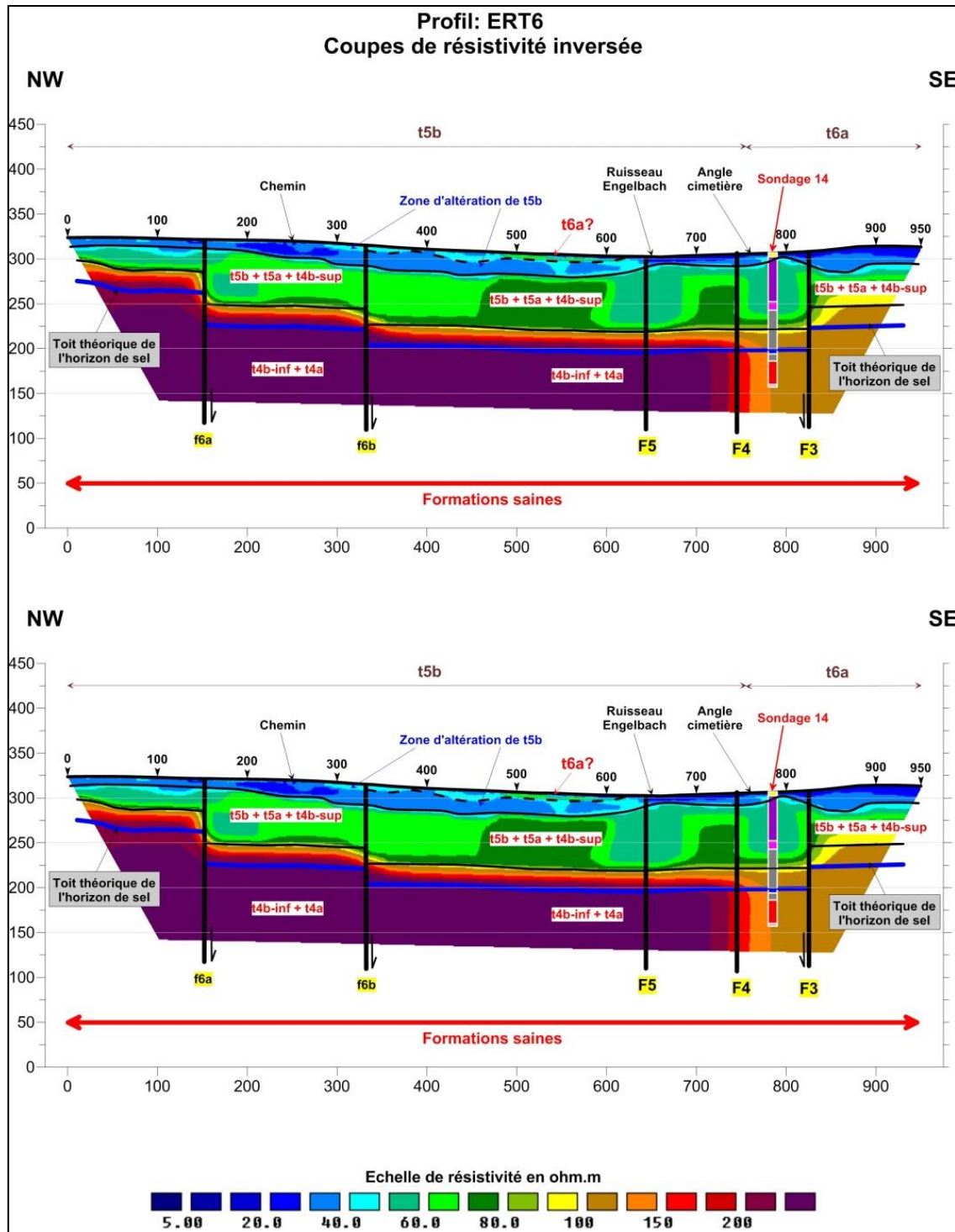


Illustration 37 - ERT6 – Coupes de résistivité inversée interprétées en termes de géologie et de stade de dissolution.

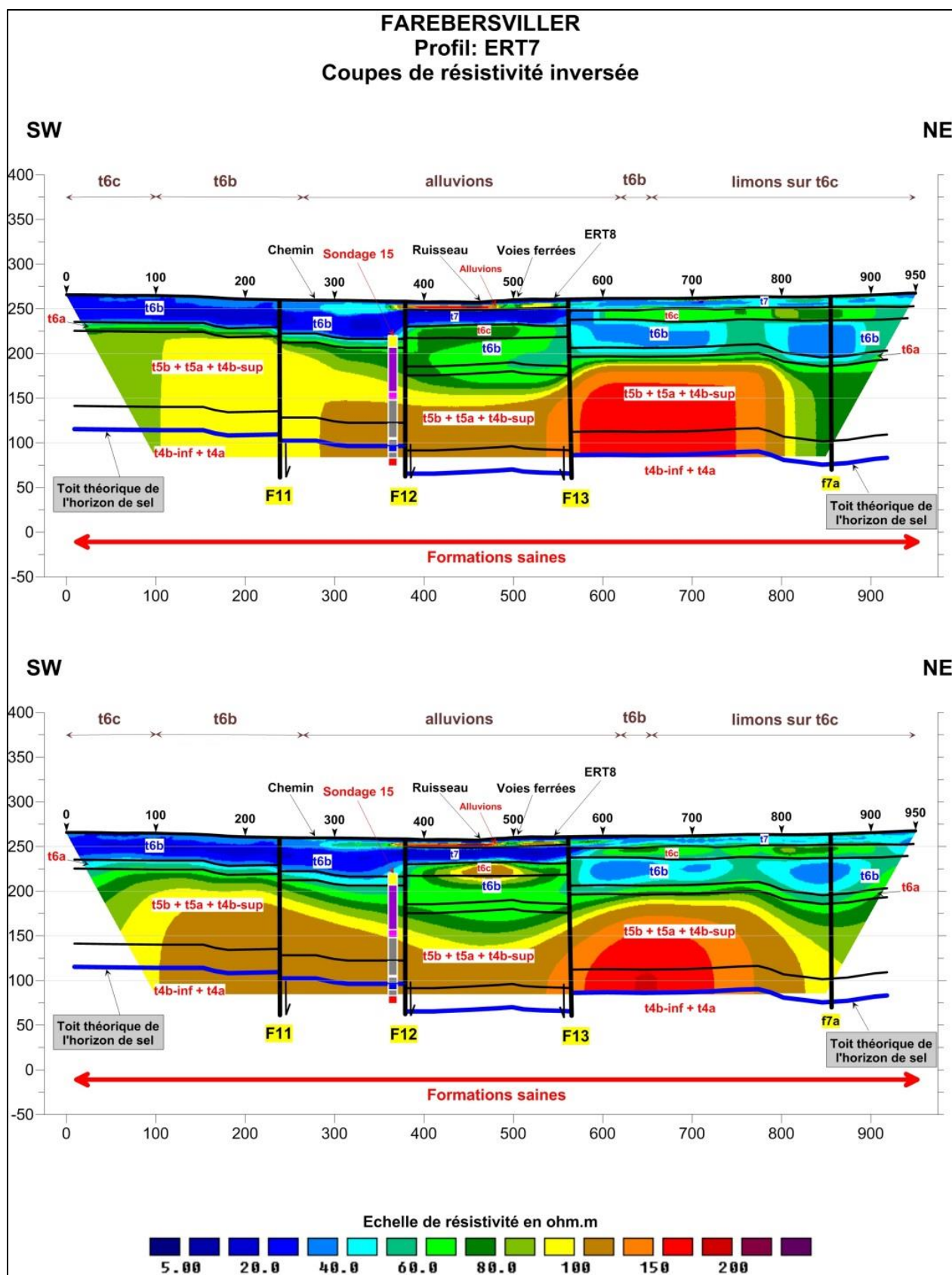


Illustration 38 - ERT7 – Coupes de résistivité inversée interprétées en termes de géologie et de stade de dissolution

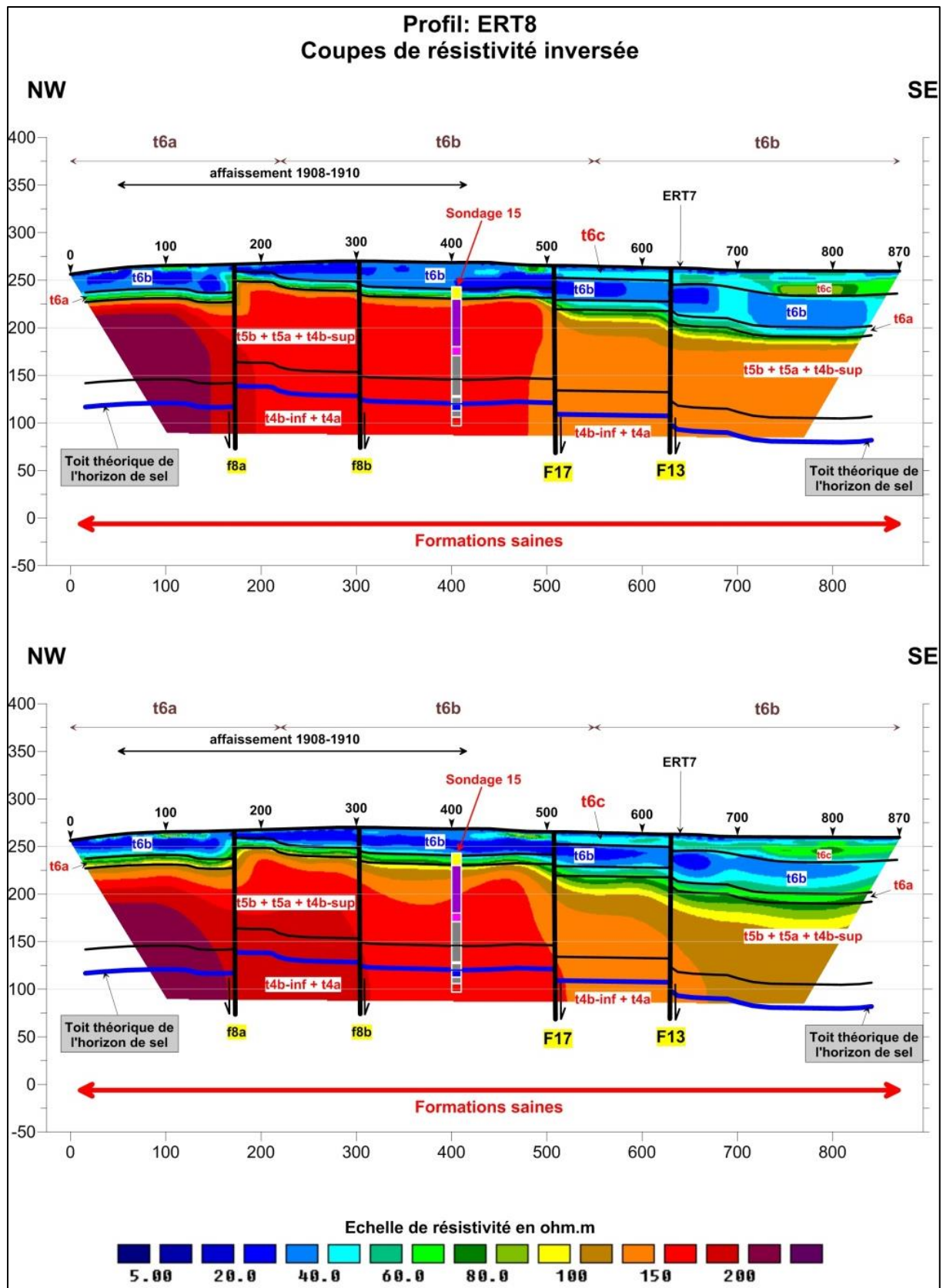


Illustration 39 - ERT8 – Coupes de résistivité inversée interprétées en termes de géologie et de stade de dissolution.

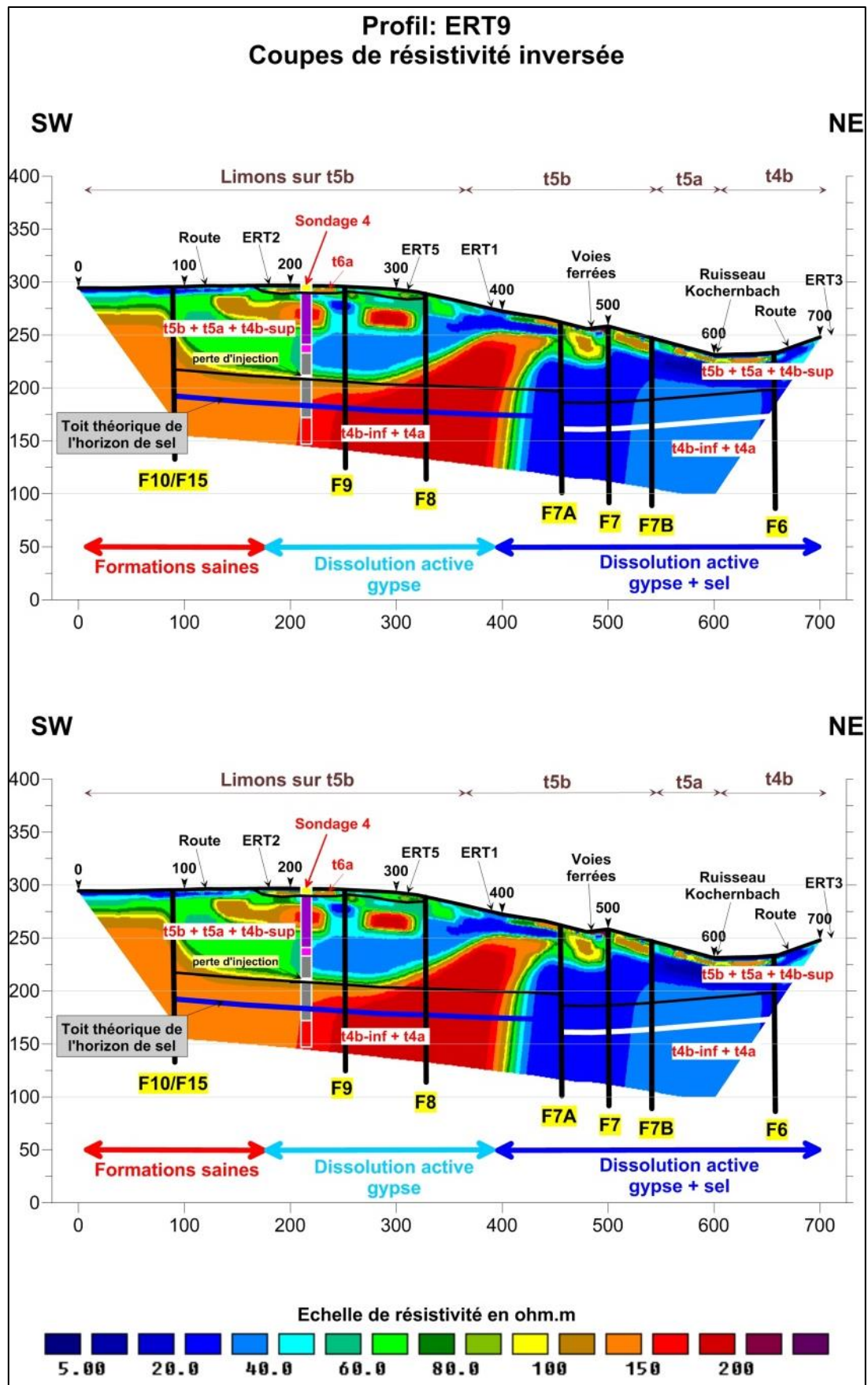


Illustration 40 - ERT9 – Coupes de résistivité inversée interprétées en termes de géologie et de stade de dissolution

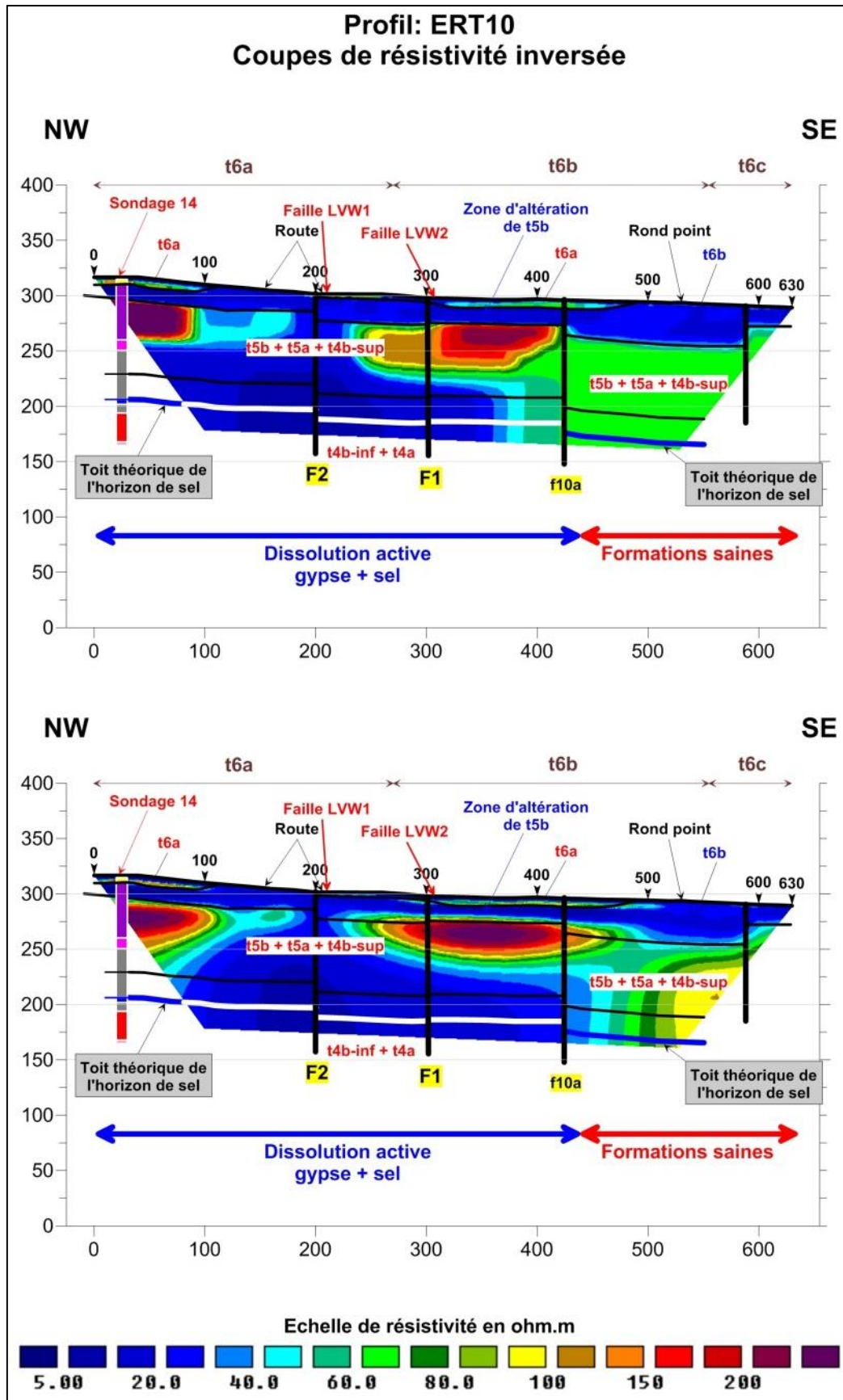


Illustration 41 - ERT10 – Coupes de résistivité inversée interprétées en termes de géologie et de stade de dissolution.

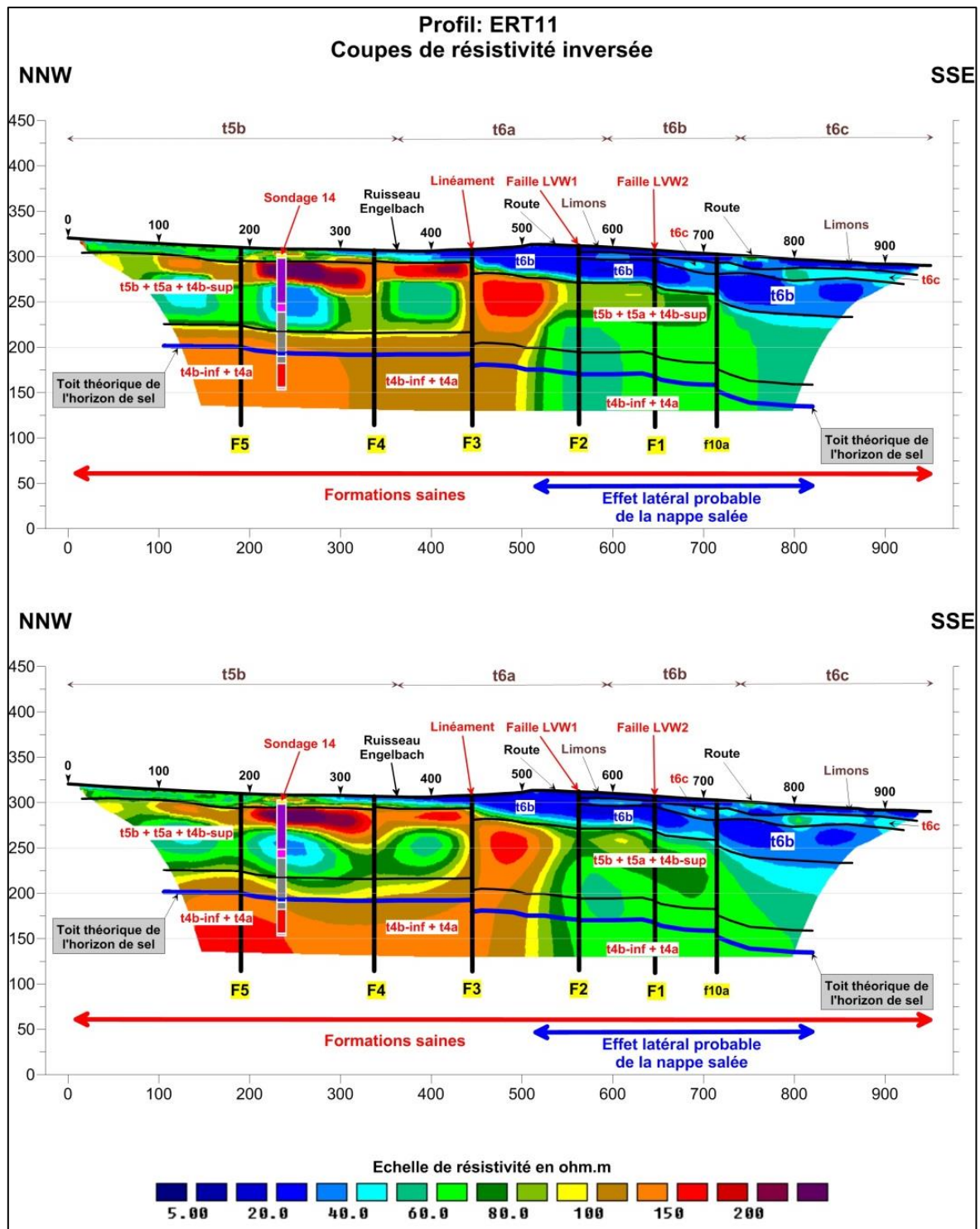


Illustration 42 - ERT11 – Coupes de résistivité inversée interprétées en termes de géologie et de stade de dissolution

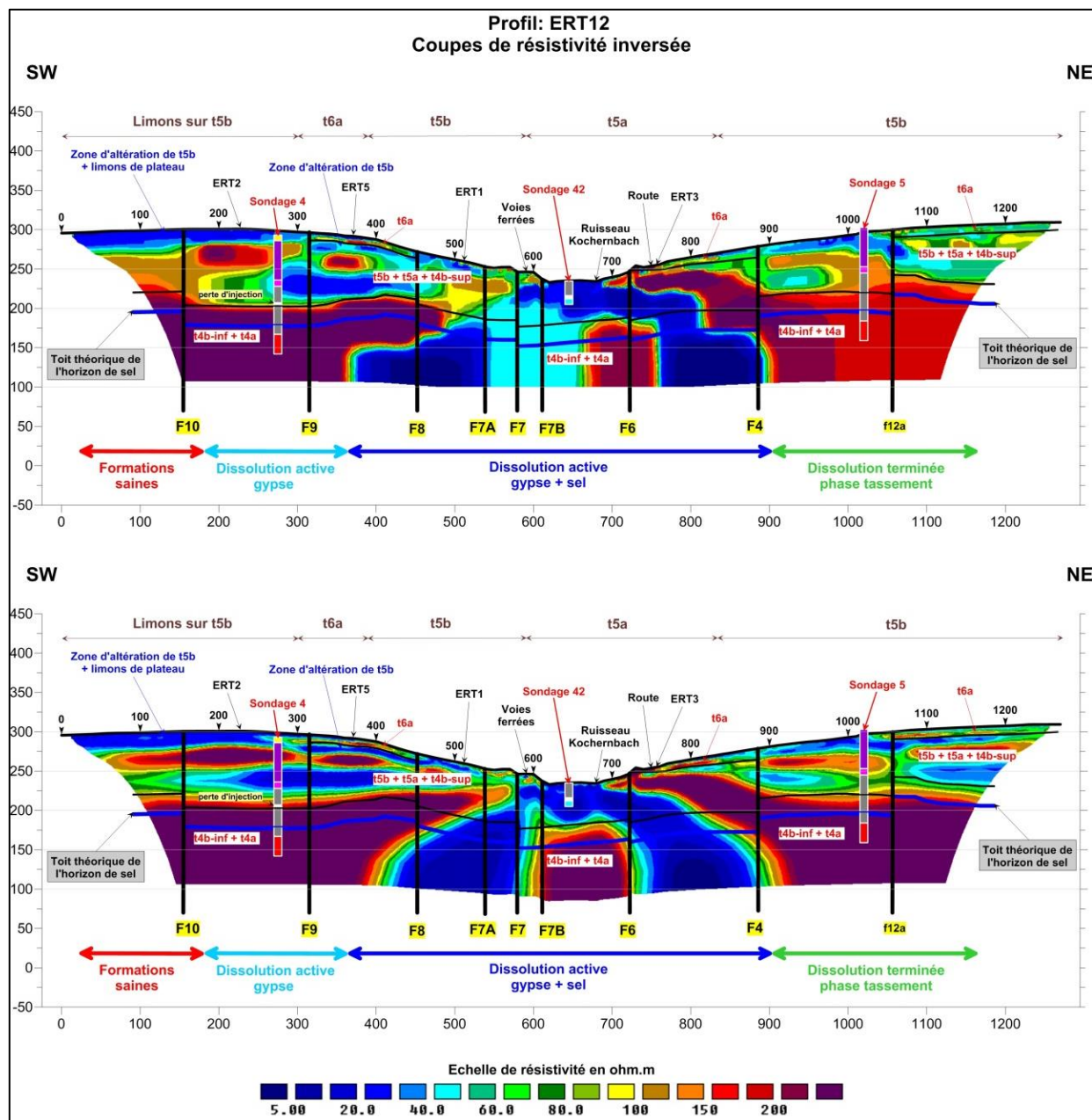


Illustration 43 - ERT12 – Coupes de résistivité inversée interprétées en termes de géologie et de stade de dissolution

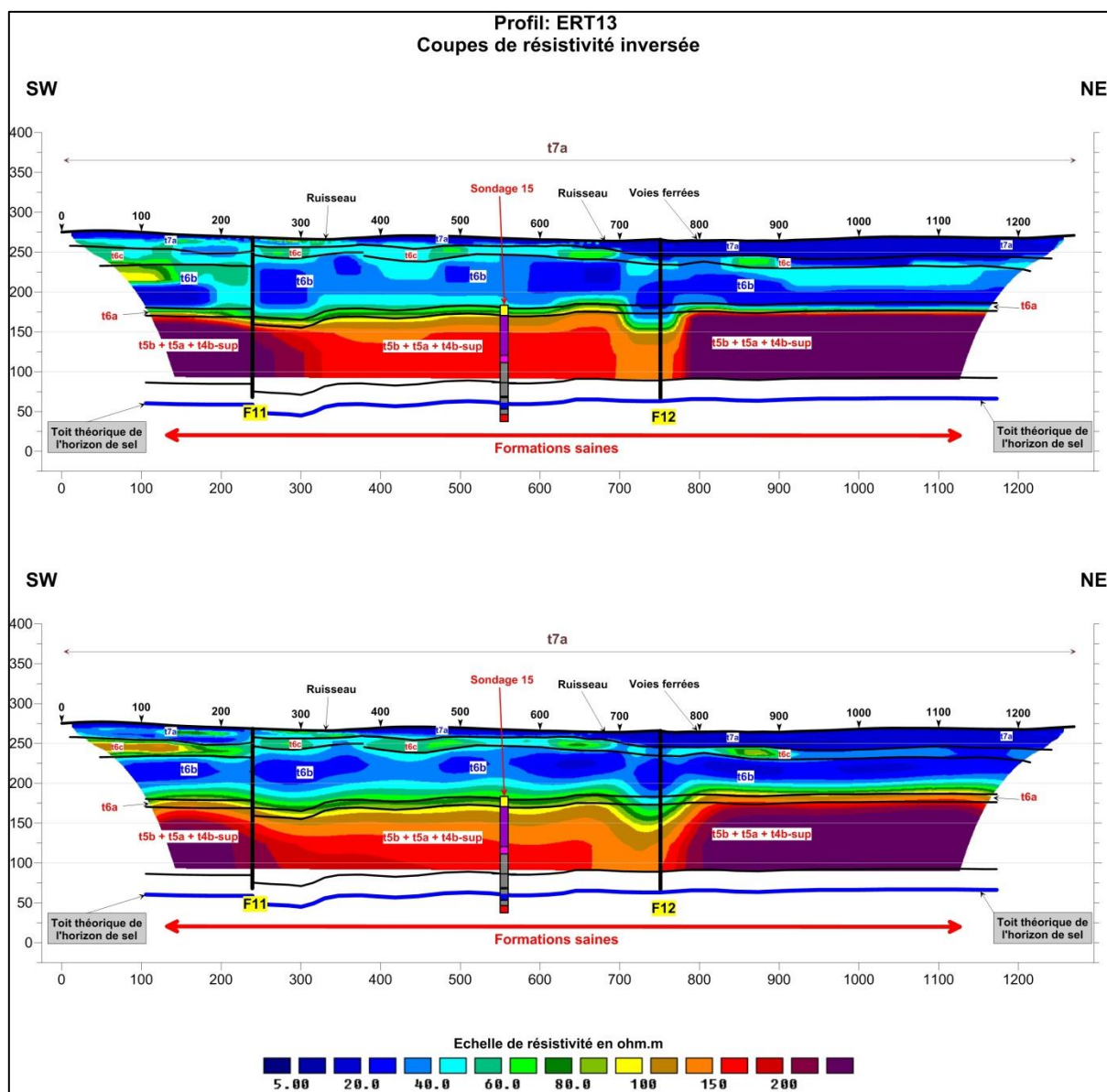


Illustration 44 - ERT13 – Coupes de résistivité inversée interprétées en termes de géologie et de stade de dissolution

Annexe 7 :

Coefficients de foisonnement préconisés par la RTR

Classe R.T.R.	Dénomination R.T.R.	Types de sols le plus fréquemment rencontrés	Densité en place (t/m ³)	Coefficient de foisonnement	Densité foisonnée (t/m ³)
A	Sols fins	Limons peu plastiques	1,6 à 1,8	1,30 à 1,40	1,260
		Limons très plastiques	1,7 à 1,9	1,35 à 1,55	1,240
		Loess	1,5 à 1,7	1,20 à 1,30	1,280
		Arènes peu plastiques	1,7 à 1,9	1,30 à 1,45	1,310
		Argiles et marnes peu plastiques	1,6 à 1,8	1,30 à 1,45	1,240
		Argiles et marnes très plastiques	1,7 à 2,0	1,40 à 1,60	1,250
		Marnes	1,8 à 2,4	1,30 à 1,40	1,560
		Sables fins argileux	1,8 à 2,1	1,25 à 1,35	1,500
		Sables fins peu argileux	1,6 à 1,8	1,10 à 1,15	1,510
B	Sols sableux ou graveleux avec fines	Silts	1,5 à 1,7	1,10 à 1,20	1,390
		Sables silteux	1,6 à 1,8	1,05 à 1,15	1,545
		Graves silteuses	1,7 à 2,0	1,10 à 1,20	1,610
		Graves peu argileuses	1,8 à 2,1	1,10 à 1,20	1,695
		Graves argileuses	1,7 à 2,0	1,15 à 1,25	1,540
		Graves très silteuses	1,6 à 1,9	1,15 à 1,25	1,460
C	Sols comportant des fines et de gros éléments	Argiles à silex	1,9 à 2,2	1,30 à 1,45	1,490
		Argiles à meulière	1,8 à 2,1	1,30 à 1,45	1,420
		Eboulis	1,8 à 1,9	1,40 à 1,50	1,275
		Moraines	1,8 à 2,0	1,40 à 1,50	1,310
		Roches altérées	1,8 à 2,0	1,20 à 1,30	1,520
		Alluvions grossières	1,8 à 2,0	1,20 à 1,30	1,520
D	Sols et roches insensibles à l'eau	Sables alluvionnaires propres	1,6 à 1,9	1,05 à 1,15	1,590
		Sables de dunes	1,4 à 1,5	1,00 à 1,10	1,380
		Graves alluvionnaires	1,8 à 2,0	1,20 à 1,30	1,520
		Roches non évolutives	1,8 à 2,0	1,20 à 1,30	1,520
		Calcaires durs	2,2 à 2,8	1,40 à 1,60	1,660
		Granit	2,4 à 2,9	1,40 à 1,60	1,770
		Porphyres	2,6 à 2,9	1,40 à 1,60	1,830
		Grès durs	1,9 à 2,7	1,40 à 1,60	1,530
		Basalte	2,7 à 3,0	1,40 à 1,60	1,900
E	Roches évolutives	Craies	1,5 à 2,3	1,30 à 1,50	1,360
		Schistes	1,9 à 2,3	1,30 à 1,50	1,500
F	Matériaux putrescibles et polluants	Terre végétale	1,2 à 1,4	1,07 à 1,15	1,170
		Humus forestiers	0,7 à 1,1	1,20 à 1,25	0,730
		Tourbes	0,3 à 0,9	1,00 à 1,10	0,570

Annexe 8 :

Carte de l'aléa affaissement au 1/5 000^{ème}(hors texte)

Annexe 9 :

Carte de l'aléa effondrement localisé au 1/5 000^{ème} (hors texte)



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemain - BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34 - www.brgm.fr

Direction régionale Grand Est – Site de Nancy
1, avenue du Parc de Brabois
54500 – Vandoeuvre-les-Nancy – France
Tél. : 03.83.44.81.49