

Antenne EST
1 Rue Claude Chappe
CS 25198
57075 METZ CEDEX 3
Tél : +33 (0)3 87 17 36 60
Fax : +33 (0)3 87 17 36 89

Evaluation du potentiel de gonflement résiduel des évaporites au droit du lotissement Weingarten à Lochwiller (Bas-Rhin) Version PROJET

RAPPORT E2016/027DE_PROJET – 16ALS21010

Date : 05/02/2016

Evaluation du potentiel de gonflement résiduel des évaporites au droit du lotissement Weingarten à Lochwiller (Bas-Rhin) Version PROJET

RAPPORT E2016/027DE_PROJET – 16ALS21010

Diffusion :

Pôle Après-mine EST
DREAL Alsace
GEODERIS

HANOCQ Pascale
BORELY Olivier
KIMMEL Marion
HADADOU Rafik

	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	M. KIMMEL	R. HADADOU	
Visa			

SOMMAIRE

1	Contexte.....	3
2	Objectif de l'étude : investigations complémentaires et évaluation semi-quantitative du potentiel de gonflement résiduel.....	3
3	Connaissances géologiques préalables.....	4
3.1	Généralités sur les argiles.....	4
3.2	Généralités sur les évaporites.....	5
3.2.1	Genèse des évaporites.....	5
3.2.2	Transformations post-sédimentaires des évaporites, et en particulier de l'anhydrite.....	6
3.2.2.1	Evolution minéralogique de l'anhydrite.....	6
3.2.2.2	Conditions d'apparition d'un gonflement.....	8
3.2.2.3	Caractéristiques du gonflement.....	9
3.2.2.4	Dissolution du gypse.....	10
3.3	Géologie régionale.....	10
3.3.1	Le Keuper d'Alsace-Lorraine.....	10
3.3.1.1	Fonctionnement du bassin évaporitique.....	10
3.3.1.2	Description des faciès anhydritiques.....	11
3.3.1.3	Description des différents types d'argilites et de minéraux argileux.....	11
3.3.2	Description du Trias des environs de Saverne.....	12
4	Acquisition d'informations relatives au site de Lochwiller.....	17
4.1	Présentation des forages réalisés.....	17
4.1.1	Rappel des buts des forages et choix de leur localisation.....	17
4.1.2	Déroulement du chantier.....	18
4.1.3	Diamètres de forages et description des équipements.....	19
4.1.4	Développement des piézomètres.....	20
4.2	Données géologiques et minéralogiques.....	21
4.2.1	Diagraphies gamma-ray : calcul du pendage géologique des couches.....	21
4.2.1.1	Principe des diagraphies gamma-ray.....	21
4.2.1.2	Résultats des diagraphies réalisées sur les forages de Lochwiller.....	21
4.2.1.3	Corrélations entre diagraphies.....	22
4.2.1.4	Calcul du pendage géologique.....	23
4.2.2	Description pétrographique et structurale des carottes de forages.....	23
4.2.2.1	Observations générales.....	23
4.2.2.2	Forage SC4.....	25
4.2.2.3	Forage SC5.....	26
4.2.2.4	Forage SC6.....	27
4.2.2.5	Forage SC7.....	27
4.2.2.6	Hypothèse de la présence d'une zone altérée.....	28
4.2.3	Données minéralogiques.....	28
4.2.3.1	Techniques d'analyses.....	28
4.2.3.2	Les différents minéraux en présence.....	29
4.2.3.3	Répartition spatiale de l'anhydrite, de la bassanite et du gypse.....	35
4.3	Données relatives aux eaux souterraines.....	39
4.3.1	Données hydrogéologiques.....	39
4.3.1.1	Piézométrie.....	39
4.3.1.2	Observations concernant la perméabilité des terrains.....	42
4.3.2	Données de température et de conductivité électrique des eaux.....	43
4.3.3	Données hydrogéochimiques.....	48
4.3.3.1	Conditions de prélèvements.....	48

4.3.3.2	Résultats des analyses chimiques.....	49
4.3.3.3	Interprétation des analyses d'eaux souterraines.....	51
4.3.3.4	Etat de saturation des eaux vis-à-vis du gypse et de l'anhydrite.....	56
4.3.4	Données de datation des eaux.....	57
4.3.4.1	Méthodes utilisées	57
4.3.4.2	Résultats des analyses	59
4.4	Analyses géotechniques	60
4.4.1	Limites d'Atterberg et valeurs de bleu de méthylène	60
4.4.1.1	Principes	60
4.4.1.2	Résultats obtenus sur les phases argileuses des terrains de Lochwiller...63	
4.4.2	Essais de gonflement ou essais œdométriques	64
4.4.2.1	Définition, objectifs et protocole des essais	64
4.4.2.2	Résultats obtenus au 26 janvier 2016	65
4.4.2.3	Interprétation des essais de gonflement.....	69
5	Synthèse et interprétation des informations acquises	71
5.1	Synthèse des observations et des analyses géologiques, minéralogiques, hydrogéologiques et chimiques	71
5.2	Synthèse des informations géotechniques	84
5.3	Prévision de poursuite de la surrection des sols.....	85
6	Conclusion.....	87
7	Références bibliographiques	92
8	Liste des annexes.....	95

Mots clés : Lochwiller, gonflement, anhydrite, forages, piézomètres, gypse, bassanite, désordres

1 CONTEXTE

Le lotissement Weingarten, sur la commune de Lochwiller (Bas-Rhin) est le siège, depuis plusieurs années, de désordres survenus sur les infrastructures et sur le bâti, liés à un phénomène de surrection des sols. Cette situation trouve son origine dans des réactions de gonflement d'anhydrite, qui se transforme en gypse en présence d'eau. Un forage géothermique fuyard est très probablement l'élément déclencheur de ces désordres, auquel s'ajouteraient ensuite des infiltrations d'eau météorique et d'eau des réseaux déstructurés par les mouvements de terrain. C'est qui ressort de l'avis donné par GEODERIS (Rapport E2014/003DE du 9 janvier 2014) à la demande de l'Etat.

En 2015, une étude sur le potentiel de gonflement résiduel des sols du lotissement a été demandée par la DREAL Alsace via le Pôle Après-mine Est. Les objectifs, et les moyens d'y parvenir, sont détaillés dans le paragraphe ci-dessous. Ainsi, cinq forages dont quatre forages carottés ont été réalisés en été 2015, et équipés en piézomètres. Ils permettent de déterminer les caractéristiques géologiques, minéralogiques, et géotechniques des terrains et d'obtenir des informations relatives à la chimie des eaux, ceci dans le but de fournir une évaluation semi-quantitative du potentiel de gonflement résiduel des sols, en termes de surrection et de cinétique.

2 OBJECTIF DE L'ETUDE : INVESTIGATIONS COMPLEMENTAIRES ET EVALUATION SEMI-QUANTITATIVE DU POTENTIEL DE GONFLEMENT RESIDUEL

L'objectif de l'étude est d'établir une évaluation de l'extension spatiale des zones concernées actuellement par les transformations minéralogiques, de leur intensité et une première analyse de leur évolution éventuelle attendue.

Le programme proposé est le suivant : il est prévu d'investiguer l'espace compris entre la surface et le niveau stratigraphique correspondant à la zone de perte dans le forage géothermique réalisé dans la propriété de M.Kandel et le fond supposé du puits Schorr (voir figure ci-dessous). Il a été estimé que poursuivre les investigations sous cette interface, correspondant à un drain potentiel, présenterait le risque de mettre localement en communication hydraulique des niveaux aujourd'hui isolés. Par ailleurs, les anhydrites paraissent mieux exprimées (sur la base de la géologie régionale) dans la partie supérieure du Keuper Inférieur.

Sur la verticale, les transformations minéralogiques sont appréhendées via des analyses réalisées sur un carottage continu des terrains. Cela a permis de déterminer si les transformations (hydratation de l'anhydrite) sont homogènes sur la pile sédimentaire, si elles concernent les horizons profonds ou, au contraire, les horizons les plus superficiels. Des hypothèses quant à l'origine des eaux qui sont la cause du phénomène sont proposées. Les extensions latérales de ces transformations ont été approchées par une implantation spécifique des forages.

L'étude a nécessité la réalisation de quatre forages carottés de la surface à la limite stratigraphique correspondant à la zone de perte :

- l'un à proximité du forage géothermique sur la propriété Kandel afin d'avoir un état près du point d'origine des eaux « profondes ». Ce forage permet par ailleurs d'avoir une coupe de référence pour les horizons supérieurs traversés par le forage Kandel et a contribué ainsi à la préparation du rebouchage de ce dernier ;
- l'un complètement à l'est du lotissement, hors des zones soulevées, de manière à poser une référence géologique de la formation du Keuper ;

- l'un à proximité de la zone de soulèvement maximum ;
- le dernier enfin dans une situation intermédiaire, décalé vers le nord.

Les profondeurs des forages sont comprises entre 22 et 47,5 m, en fonction de leur position.

Ces carottages donnent accès à la géologie détaillée et la répartition, ainsi que le mode d'expression de l'anhydrite et du gypse (dispersé, massif) sur toute la colonne. Les couches d'argile sont également étudiées. Cela permet d'évaluer leur rôle dans le phénomène de gonflement de l'anhydrite en fonction de leur nature minéralogique, de l'épaisseur de leurs couches, du mode d'interstratification avec l'anhydrite, etc. Les diagraphies gamma-ray ont permis des corrélations entre ces forages mais aussi avec l'inclinomètre n°2.

Le programme est complété par des essais en laboratoire sur les carottes : essais de gonflement notamment, ainsi que sur les eaux. Des analyses chimiques ont été réalisées en vue de connaître le degré de saturation des eaux vis-à-vis des phases minéralogiques en présence, sur les différents forages. De plus, des analyses géochimiques isotopiques ont été effectuées également, sur ces mêmes eaux afin de fournir des éléments quant à leur origine. Au-delà de l'aspect « quantitatif » immédiatement utilisable pour une évaluation grossière, ces données seront également intégrées, selon leur qualité, dans les phases ultérieures.

Au final, les données de sortie de cette phase seront :

- un modèle structural (représentant les interfaces des couches) sur l'épaisseur investiguée. Ce modèle, qui restera relativement simple, devra permettre de positionner dans l'espace les différentes informations ci-après ;
- des profils « d'hydratation de l'anhydrite » à l'emplacement des forages, données qui pourront être extrapolées sur l'ensemble de la zone en habillage du modèle ;
- une première évaluation du stock d'anhydrite restant et du potentiel de gonflement résiduel restant à survenir ;
- une approche qualitative (à semi-quantitative) des cinétiques de réaction permettant d'évaluer les temps caractéristiques pour la poursuite du phénomène.

3 CONNAISSANCES GEOLOGIQUES PREALABLES

Une brève synthèse bibliographique concernant les argiles, l'anhydrite, le gypse, et leur évolution en présence d'eau est proposée ci-dessous, afin d'aider à la compréhension de l'étude.

3.1 Généralités sur les argiles

Les argiles, ou minéraux argileux, sont des silicates d'aluminium plus ou moins hydratés présentant une structure feuilletée expliquant leur plasticité. Les minéraux argileux sont constitués à partir d'un empilement de feuillets tétraédriques et octaédriques entrecoupé par un espace appelé espace interfoliaire. On différencie les argiles par leur type de combinaison d'empilement des feuillets tétraédriques et octaédriques, par le cation de la couche octaédrique, par la charge de l'argile et par le type de matériel interfoliaire (matériel présent entre les feuillets).

Certaines argiles présentent la capacité d'augmenter leurs espaces interfoliaires. Cette propriété provient de l'incorporation de cations hydratés (Na^+ , Ca^{2+} , etc.) dans ces espaces.

Les trois phases argileuses identifiées par les analyses minéralogiques des carottes prélevées à Lochwiller (cf. 4.2.2) sont présentées succinctement ci-dessous. Il s'agit de l'illite, de la chlorite et des smectites.

L'illite

L'espace interfoliaire de l'illite est occupé par des ions potassium peu hydratés, responsables de la fermeture des feuillets argileux et de l'absence de propriété de gonflement de l'illite [2]. Selon [1], l'illite est sans doute le minéral le plus fréquent dans les sédiments triasiques lorrains.

La chlorite

Cette argile est hydratée, elle contient donc de l'eau dans son espace interfoliaire, ainsi que des cations de taille moyenne, le plus souvent du fer, du magnésium ou de l'aluminium [2]. Selon [4], la chlorite est très minoritaire dans les Marnes irisées inférieures.

Les smectites

Les smectites sont apparues également dans les résultats des analyses des carottes de Lochwiller. Il s'agit d'un groupe de minéraux argileux qui présentent des liaisons particulièrement lâches entre les feuillets constitutifs, ce qui facilite l'acquisition ou le départ d'eau. Cette particularité permet à l'eau de pénétrer dans l'espace situé entre les feuillets, autorisant ainsi de fortes variations de volume (on parle de *gonflement interfoliaire* ou *intercrystallin*) [5]. Le gonflement est d'autant plus important que l'humidité est élevée. À un état parfaitement sec, une smectite n'aura aucune molécule d'eau [2]. Les smectites peuvent en outre contenir les cations suivants : fer, aluminium, magnésium ou silicium.

Argiles interstratifiées

Il existe également des argiles interstratifiées, qui comprennent une alternance plus ou moins régulière de feuillets de nature différente, par exemple des interstratifiées illite-smectite, ou chlorite-smectite, qui sont également sensibles au gonflement en présence d'eau.

La sensibilité au gonflement des argiles est également liée à la surface spécifique particulièrement importante de certaines argiles (smectites). La quantité d'eau que peut renfermer une argile est directement fonction de celle-ci [3].

3.2 Généralités sur les évaporites

3.2.1 Genèse des évaporites

Il est actuellement clairement établi que le phénomène de surrection des sols à Lochwiller trouve son origine dans le gonflement d'argiles à anhydrite, minéral qui se transforme en gypse en présence d'eau. Ces deux minéraux sont des évaporites, ou roches salines. Il s'agit de sédiments chimiques composés de minéraux qui cristallisent à partir des substances dissoutes dans les eaux marines et concentrées par évaporation.

L'évaporation de l'eau de mer peut se produire dans des bassins, ou lagunes, partiellement ou totalement confinés. Elle conduit à la réduction du volume d'eau initial. L'évaporation doit être supérieure aux apports d'eaux extérieurs. Ceci amène la concentration des ions présents dans les eaux à un niveau supérieur à celui de leur produit de solubilité, conduisant à faire précipiter les minéraux. L'évaporation de l'eau de mer conduit à précipiter du NaCl (halite, ou sel de cuisine), des sels de potasse, et du sulfate de calcium (CaSO₄). Au fur et à

mesure que l'évaporation se poursuit, le sulfate de calcium est le premier à précipiter, soit sous la forme hydratée (gypse : $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), soit sous la forme anhydre (anhydrite : CaSO_4), lorsque le volume de l'eau est réduit à environ 20-30% de son volume initial. L'orientation de la précipitation vers l'une ou l'autre forme dépend essentiellement de la salinité, et de la température des eaux [6]. Lorsque le volume d'eau est réduit à 10% du volume initial, la halite précipite (NaCl), suivie par d'autres sels, dont les sels de potasse.

Dans une solution pure de CaSO_4 , l'anhydrite ne précipite que pour des températures supérieures à 60°C , mais en présence d'autres sels, sa température de précipitation peut descendre jusqu'à $25-30^\circ\text{C}$ en fonction de la concentration saline. Selon [6], dans les conditions naturelles, le gypse est la forme la plus courante des évaporites marines, tandis que l'anhydrite se développe surtout dans la zone de battement des marées, ou au-dessus du niveau marin, là où les sédiments peuvent être suffisamment chauffés par le soleil et atteindre des températures plus élevées. Plusieurs hypothèses sont envisagées par les auteurs concernant la précipitation du gypse et de l'anhydrite.

- Première hypothèse, le gypse et l'anhydrite peuvent résulter d'une précipitation subaquatique qui se serait développée dans des bassins semi-isolés, conservant une connexion plus ou moins importante avec la mer plus profonde. En effet, dans ce type de bassin alimenté périodiquement en eau de mer, le renouvellement des saumures favorise les sels les moins solubles, et dans la séquence évaporitique (ordre de cristallisation des minéraux), les stades carbonates (calcaire, dolomie) et sulfates de calcium (gypse et/ou anhydrite), sont plus développés que les stades halite (NaCl) et sels de potasse, qui ne sont même souvent jamais atteints ;
- Deuxième hypothèse, le gypse et l'anhydrite peuvent résulter d'une précipitation subaérienne, c'est-à-dire qui se produit à l'intérieur des sédiments émergés, à partir des eaux interstitielles. En général, c'est plutôt l'anhydrite qui précipite plutôt que le gypse, en faciès nodulaires, lenticulaires ou en bancs contournés (structure entérolithique) ;
- Troisième hypothèse, la littérature mentionne le fait que l'anhydrite peut aussi résulter de phénomènes post-sédimentaires de déshydratation de gypse « précurseur » (cf. § 3.2.2), lorsque celui-ci est soumis à des fortes températures, par exemple lors de l'enfouissement.

3.2.2 Transformations post-sédimentaires des évaporites, et en particulier de l'anhydrite

La diagenèse¹ occupe une place très importante dans les séries évaporitiques. Il s'agit de transformations, qui commencent dès le dépôt du sédiment, et se poursuivent tout au long de l'histoire post-sédimentaire. Elles engendrent des circulations de fluides très concentrés responsables des transformations diagénétiques tardives qui affectent les séries salines traversées mais aussi les autres formations de la colonne sédimentaire [5].

3.2.2.1 Evolution minéralogique de l'anhydrite

L'hydratation de l'anhydrite en gypse secondaire peut intervenir dans des conditions de diagenèse précoce, ou tardive : par mise en contact d'anhydrite avec les eaux interstitielles météoriques au cours de la remontée des couches et de l'érosion [6]. Cette transformation

¹ Diagenèse : ensemble des processus physico-chimiques par lesquels les sédiments sont transformés en roches sédimentaires. Ces transformations ont généralement lieu à faible profondeur, donc dans des conditions de pression et température peu élevées. Elles engagent des processus variés, notamment : compaction, déshydratation, dissolution, cimentation, et autres.

de l'anhydrite s'accompagne d'une modification de volume, c'est-à-dire d'un gonflement. Selon [5], cette transformation en gypse secondaire respecte généralement les morphologies nodulaires initiales, ce qui ne permet pas de les distinguer facilement. Les microfaciès, par contre, sont toujours caractéristiques soit de l'anhydrite primaire, soit du gypse secondaire : mosaïques de cristaux automorphes, macrocristaux souvent riches en inclusions d'anhydrite, abondantes veinules ou filonnets de gypse fibreux. La présence de gypse fibreux associé aux faciès nodulaires est également un trait caractéristique du gypse secondaire de réhydratation d'anhydrite. Il a été interprété comme représentant le volume additionnel de gypse qui correspond à l'augmentation de volume attendue de la transformation [5].

Kinsman [7] précise que le passage de l'un à l'autre peut se faire en phases solides (déshydratation ou réhydratation à l'état solide) ou via une dissolution de l'anhydrite dans l'eau présente dans le milieu suivie par la cristallisation de gypse. L'apparition de gypse à partir d'anhydrite est à l'origine d'un gonflement de 61% (1 mole d'anhydrite $46,2 \text{ cm}^3 \rightarrow$ 1 mole de gypse $74,3 \text{ cm}^3$) (Figure 1).

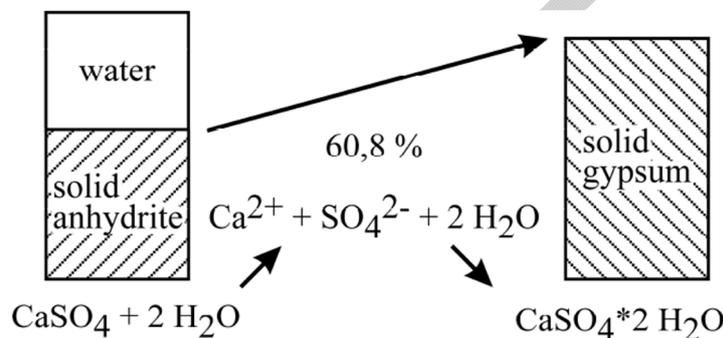


Figure 1 – Passage de l'anhydrite au gypse, en termes chimiques et volumiques [8]

Selon Anagnostou *et al.* [9], le passage de l'anhydrite en gypse se fait plutôt par dissolution-recristallisation (Figure 2). L'anhydrite se dissout dans l'eau interstitielle et, comme le produit de solubilité du gypse est inférieur à celui de l'anhydrite, le gypse précipite à partir de la solution tandis que les ions calcium et sulfate peuvent circuler par convection et, en raison de gradients de concentration ionique, également par diffusion. La dissolution de l'anhydrite et la précipitation du gypse se produisent conjointement avec le processus de transport. En plus de la cinétique de réaction, la vitesse de circulation de l'eau interstitielle est également importante. Il est théoriquement possible et il a été observé que la dissolution-lixiviation de la roche se produise dans un secteur, et que la cristallisation du gypse se produise dans un autre secteur, même s'il était vierge d'anhydrite initialement [9].

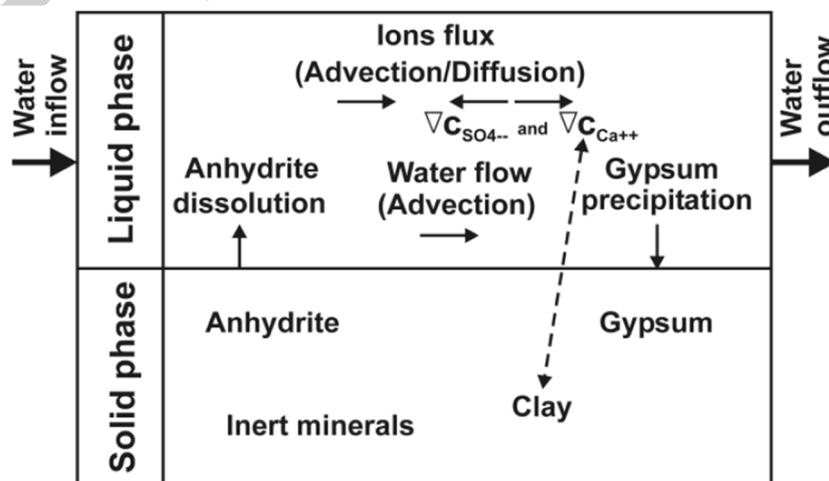


Figure 2 – Phases et constituants du milieu poreux et processus en présence [9]

En outre, il convient d'ajouter que la transformation anhydrite \leftrightarrow gypse met en jeu une troisième phase minérale qui est métastable dans les conditions naturelles : l'hémi-hydrate ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$) ou bassanite. La découverte de proportions importantes de bassanite par Géoressources, le laboratoire en charge des analyses minéralogiques (cf. § 4.2.3), dans les échantillons prélevés à Lochwiller conduit à décrire ce minéral et ses caractéristiques, en particulier en termes de gonflement.

Van Driessche et al. [10] ont pu reproduire en laboratoire la cristallisation de bassanite, puis de gypse, à partir d'une solution sursaturée vis-à-vis du gypse. Des particules de bassanite ont cristallisé tout d'abord sous la forme de petites particules évoluant vers des nano-bâtonnets de longueur maximale de 100 nm, qui se sont révélés poreux. Les auteurs rapportent que la présence de pores est connue dans les cristaux de bassanite. Les nano-bâtonnets se sont ensuite assemblés en agrégats, puis transformés en cristaux de gypse minces, micrométriques, sans repasser en phase dissoute. Ils rapportent que d'autres travaux mentionnent l'apparition de bassanite amorphe, donc non cristallisée, antérieurement à sa transformation en gypse.

3.2.2.2 Conditions d'apparition d'un gonflement

Les circulations d'eaux souterraines

On conçoit aisément que la perméabilité, la porosité, et les conditions hydrauliques jouent un rôle tout aussi important que la cinétique chimique de la réaction [11]. Pour que l'eau vienne en contact avec l'anhydrite, il faut supposer une certaine porosité de l'anhydrite. Si l'eau circule avec un faible gradient hydraulique, il peut y avoir formation de gypse et le gypse peut colmater la porosité ce qui arrêtera la réaction. Mais avec un gradient hydraulique plus important, c'est la dissolution qui l'emportera.

En conséquence, les différentes configurations de circulation des eaux souterraines à grande échelle peuvent être la raison de la variabilité observée dans l'intensité du gonflement. Celle-ci varie donc en fonction des conditions d'écoulement et de leur évolution en cas d'intervention anthropique, type creusement d'un tunnel ou autre, en fonction de l'hydrologie de surface, des écoulements de sub-surface, des structures géologiques ou de la morphologie du sol. La perméabilité des terrains et la vitesse d'écoulement qui en découle sont importantes (d'après [9]).

En l'absence de perméabilité de fracture, la matrice argileuse gouverne le transport de l'eau et, en parallèle, les minéraux argileux sont susceptibles d'affecter l'équilibre thermodynamique du système anhydrite-gypse-eau en jouant un rôle sur la fixation ou l'apport d'ions calcium.

Il est à noter par ailleurs que l'hydratation de l'anhydrite a lieu sur sa surface. Par conséquent, une anhydrite massive et peu fissurée a tendance à gonfler moins qu'une anhydrite finement divisée [12], ou finement litée.

L'état de contrainte naturel

L'état de contrainte naturel joue un rôle important sur la survenue d'une surrection liée à un gonflement. Si le confinement est faible, le gonflement peut mécaniquement se produire. S'il est plus important (plus élevé que la pression de gonflement que l'on mesure en laboratoire au cours des essais de gonflement normalisés), alors le gonflement ne peut se produire [11]. Lorsque la couche d'anhydrite est à l'affleurement, les contraintes naturelles sont faibles, les microfissures peuvent s'ouvrir et la gypsification peut se produire. Le gypse secondaire apparaît et peut rester en place. En profondeur, le confinement plus important ne permet pas

l'ouverture de microfissures et l'eau ne peut circuler. Même s'il en arrivait en petite quantité, le confinement s'opposerait à la pression de gonflement. L'anhydrite peut donc subsister.

En résumé

Selon Robert et Fabre [36], pour que le gonflement puisse avoir lieu, trois conditions sont nécessaires :

- existence de minéraux susceptibles de gonflement par hydratation, principalement l'anhydrite et les argiles gonflantes (smectites) ;
- présence d'eau ;
- état de contrainte faible (contrainte principale majeure inférieure à la pression de gonflement), donc présence de l'anhydrite à faible profondeur.

3.2.2.3 Caractéristiques du gonflement

Selon [13], la texture de la roche détermine l'évolution temporelle et le potentiel de gonflement des minéralogies en présence :

- les roches anhydritiques pures ne gonflent pratiquement pas ;
- un gonflement se produit si le contenu en argile dépasse 5 %, avec des pressions de gonflement excédant 1 MPa ;
- les roches se composant de 10 à 15 % d'argiles et de 70 à 75 % d'anhydrite présentent un potentiel de gonflement excédant 4 MPa (déformation axiale inférieure à 2,5 %) ;
- lorsque le contenu en argile dépasse 15 % et que celui de l'anhydrite est inférieur à 70 %, le potentiel de gonflement diminue.

Plus un échantillon d'anhydrite argilifère contient d'argile, plus la transformation d'anhydrite en gypse se fait rapidement. Après deux ans, et en l'absence de toute contrainte, des échantillons à 5 % d'argile présentent un volume de gonflement supérieur à 100 % alors que 90 % de l'anhydrite s'est transformée en gypse [13].

Bien que l'anhydrite soit reconnue comme la cause principale du gonflement des roches mixtes (argile + anhydrite), la tendance actuelle est à attribuer à la présence de minéraux argileux, comme la corrensite (interstratifiée chlorite-smectite), la montmorillonite (il s'agit d'une smectite) et l'illite, une grande partie des effets de gonflement [14].

La durée du processus de gonflement est très longue. La plupart des essais en laboratoire se sont terminés avant qu'un état stationnaire ne soit atteint. Le gonflement de l'anhydrite dans un tunnel ferroviaire suisse instrumenté n'est toujours pas stabilisé des années plus tard [9].

Un article d'Azam [15] fait état d'essais de gonflements dans des œdomètres sur des échantillons purs (argiles, anhydrite, bassanite, et gypse) prélevées sur un site en Arabie Saoudite. C'est le seul article *a priori* disponible sur le gonflement de la bassanite. Il a obtenu les résultats suivants : l'anhydrite a gonflé de 9,32 %, la bassanite de 8,00 %, le gypse de 2,34 %, et les argiles de 34,3 %. Ces données, bien qu'expérimentales, fournissent des informations intéressantes. L'auteur précise que du fait du confinement important et de la rigidité de l'anneau œdométrique, le potentiel de gonflement mesuré dans un œdomètre conventionnel est seulement de 15 % de la valeur théorique de 62 % pour l'anhydrite, estimé sur les volumes molaires et pour un système ouvert qui permet des entrées-sorties libres des

eaux pendant l'hydratation. Il ajoute que les valeurs obtenues permettent toutefois de bonnes comparaisons entre les différents matériaux testés.

En conséquence, au vu des valeurs obtenues par ses essais expérimentaux, nous pouvons en déduire que la bassanite, proportionnellement au gonflement de l'anhydrite, présenterait une augmentation volumique théorique, lors de sa transformation en gypse, d'environ 52 %.

Il a testé ensuite des échantillons naturels de phases pures, et des mélanges de synthèse, comprenant différentes parts d'argiles, et d'évaporites. Il est ressorti de ses essais que le potentiel de gonflement des argiles diminue avec l'augmentation de la part volumique de sulfate de calcium, du fait que ce dernier (que ce soit sous forme d'anhydrite, de bassanite, et surtout de gypse) gonfle moins que les argiles testées. Une influence de la cimentation des particules par le gypse précipité a été mise en évidence également, et passe pour responsable de la diminution du gonflement des argiles en présence de minéraux sulfatés. L'ajout de 20 % d'anhydrite dans une phase argileuse inhibe le potentiel de gonflement de l'argile par la cimentation et les ponts créés entre les particules argileuses.

3.2.2.4 Dissolution du gypse

Le gypse est très soluble (2 g/l à 20°C), davantage soluble que l'anhydrite (3 g/l à 20°C) [16]. Une fois l'anhydrite transformée en gypse, il est possible, si de l'eau sous-saturée vis-à-vis de ce minéral circule en contact avec ce dernier, que le gypse se dissolve. Dans le Trias germanique (Keuper de l'est de la France), cela peut se produire dans des fissures ouvertes, ou entre les bancs sédimentaires déstructurés par le gonflement. Dans des formations gypseuses plus massives (dans le Bassin Parisien, ou les Alpes), du karst se développe fréquemment.

3.3 Géologie régionale

3.3.1 Le Keuper d'Alsace-Lorraine

3.3.1.1 Fonctionnement du bassin évaporitique

Le Keuper de l'est de la France marque la transition entre un sous-bassin sédimentaire marginal dépendant de la mer germanique, et l'individualisation du Bassin de Paris, par le déplacement d'est en ouest de la sédimentation évaporitique et de la subsidence en général [1]. Les observations de H. Rashid [1] dans sa thèse consacrée aux marnes à anhydrite de Lorraine, situées sous les dépôts salifères de Lorraine (dans les Couches à pseudomorphoses), et juste au-dessus de ces derniers (dans les Marnes à Esthéries), l'ont conduit à mettre en évidence des séquences de dépôt correspondant à des alternances d'épisodes inondation-émersion, caractéristiques des bassins évaporitiques. Il fait état d'une extrême platitude des environnements de dépôt, qui a des conséquences importantes : les inondations par les eaux pluviales et les incursions marines peuvent s'y étaler très vite et très largement, et, si ces apports liquides sont limités, en une tranche d'eau de faible épaisseur. Sous climat aride, l'évaporation de l'eau est très rapide, ce qui provoque l'augmentation de la salinité dans les eaux libres comme dans les nappes phréatiques, d'où la précipitation des évaporites. L'émersion totale des dépôts peut être atteinte.

L'absence de sel gemme en Alsace serait issue d'une migration vers l'ouest (soit l'actuelle Lorraine) des solutions salées, une fois débarrassées de leur sulfate de calcium déposé en Alsace, vers des régions plus subsidentes de la lagune [17]. Il en résulterait les dépôts de sel gemme très conséquents en Lorraine, dans la région de Nancy.

3.3.1.2 Description des faciès anhydritiques

H. Rashid [1] décrit la présence d'anhydrite, dans les Marnes irisées inférieures, sous la forme de nodules, de lamines, ou de remplissage de fissures, anhydrite qui n'a nullement été transformée en gypse sur le secteur décrit, situé aux environs de Nancy, certainement du fait de la profondeur actuelle de ces dépôts. Cette profondeur les laisserait hors de toutes circulations d'eau, ou alors la contrainte verticale des terrains sus-jacents s'opposerait au gonflement de l'anhydrite, la laissant intacte.

Pour lui, il s'agit d'anhydrite primaire, et non issue de la déshydratation de gypse précurseur. C'est ce qui ressort également des observations en lames minces des terrains de Lochwiller (cf. § 4.2.3).

Enfin, il interprète la présence de nodules d'anhydrite comme des cristallisations qui se sont produites dans la zone d'évaporation capillaire des terrains, au-dessus du niveau de la nappe phréatique, et au-dessus du niveau marin, donc en période d'émergence. L'évaporation intense a concentré les eaux interstitielles. Il s'agit alors d'une anhydrite « diagénétique ».

L'anhydrite de Lorraine se trouve en alternance, comme en Alsace, avec des marnes bariolées, vertes, rouges, grises, ou noires.

3.3.1.3 Description des différents types d'argilites et de minéraux argileux

H. Rashid [1] sépare différents types de dépôts argileux à l'intérieur de cette formation sédimentaire des Marnes à anhydrite de Lorraine. Il sera vu plus loin, au § 4.2.2, que des observations similaires peuvent être faites sur les carottes de Lochwiller. Il note la présence de :

- Dépôts sub-aquatiques (déposés sous le niveau de la mer) :
 - des argilites noires ou gris sombre sont présentes à la base des séquences de dépôt. Elles se sont déposées dans un milieu immergé réducteur auquel elles doivent leur teinte, à faible profondeur. Les lamines anhydritiques de précipitation directe indiquent que les eaux du bassin étaient des saumures par intermittence saturées vis-à-vis du sulfate de calcium ;
 - des argilites gris-vert, plus ou moins bien stratifiées ou même massives, surmontent en général les argilites sombres et sont à la base des argilites bariolées. C'est un faciès intermédiaire, déposé dans des eaux moins réductrices et moins concentrées que les argilites sombres, et dans un environnement moins profond. Elles ne comportent plus de lamines d'anhydrite mais plutôt des nodules, ou de l'anhydrite en imprégnation.
- Dépôts émergés (déposés au-dessus du niveau de la mer) :
 - des argilites rouges ou bariolées sont ensuite observées. Elles doivent leur couleur à la présence d'un oxyde de fer, l'hématite (Fe_2O_3). Pour conserver cette couleur rouge, qui provient des sédiments argileux détritiques qui les composent, les dépôts doivent être exposés à l'air obligatoirement, faute de quoi ils deviendraient gris ou noirs. Selon [1], cette émergence témoigne d'un climat très aride, qui est également essentiel à la formation de l'anhydrite.

Cette phase d'émersion s'accompagne de déformations des structures, fissurations, diagenèses diverses, dissolution, érosion, etc.

La description, plus loin dans le rapport, des terrains rencontrés à Lochwiller permettra de faire le lien avec ces éléments.

Rashid [1] a procédé à des analyses des minéraux argileux, et a déterminé la présence, dans les marnes du Keuper inférieur de Lorraine, d'illite, de chlorite, de smectites, et d'interstratifiés illite-smectite et chlorite-smectites (corrensite). Dans le Trias de Lorraine, il a déterminé que l'illite se trouve seule ou domine largement la chlorite, et ne dépasse pas 40% pour les faciès évaporitiques dans lesquels les minéraux argileux magnésiens (chlorite et interstratifiés à chlorite) sont majoritaires.

Dans la notice de la carte géologique, il est précisé que les argiles du Keuper, selon Lucas [18], comprennent une association d'illite, généralement assez ouverte, d'interstratifiés illite-chlorite (dont la corrensite) et de chlorite, souvent en faible quantité. Il peut s'y ajouter un peu de kaolinite. Les interstratifiés, en particulier la corrensite, sont généralement associés aux faciès évaporitiques.

Il n'est pas fait mention, ni par Rashid, ni par Lucas, de smectites, alors que ces minéraux gonflants se sont avérés majoritaires dans les analyses (cf. § 4.2.3.2) de Lochwiller.

3.3.2 Description du Trias des environs de Saverne

La carte géologique de Saverne [4], éditée par le BRGM au 1/50 000, montre que la commune de Lochwiller est bâtie sur des formations géologiques sédimentaires du Trias supérieur, et plus précisément du Keuper inférieur. Sous le Keuper se rencontrent les couches de la Lettenkohle, puis du Muschelkalk (Figure 3).

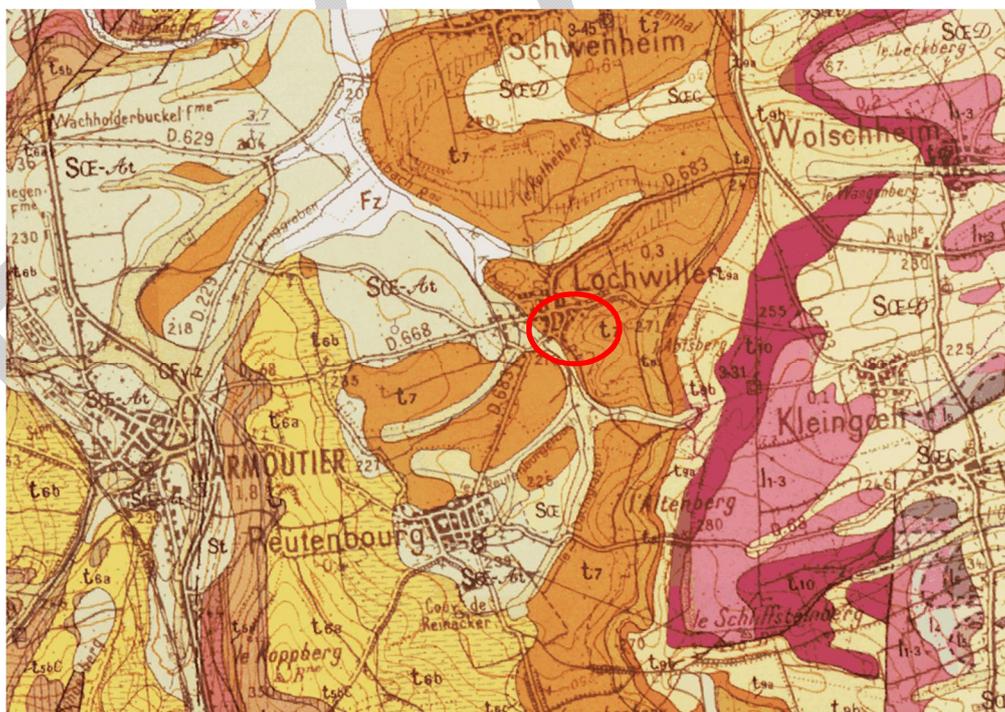


Figure 3 – Extrait de la carte géologique au 1/50 000 (BRGM) - En rouge : localisation de la zone d'étude à Lochwiller

Les couches sont décrites ci-dessous, des plus anciennes aux plus récentes :

- le Muschelkalk moyen symbolisé « t4 » (45 m d'épaisseur) : marnes dolomitiques en plaquettes, puis argilites bariolées rouges et grises et marnes dolomitiques verdâtres. Les couches sont riches en évaporites, formées dans un milieu lagunaire sursalé.
- le Muschelkalk supérieur symbolisé « t5 » (50 à 70 m d'épaisseur) : couches sédimentaires composées de calcaires coquilliers déposés sur une plate-forme littorale en milieu franchement marin ;
- la Lettenkohle symbolisée « t6 » : couches sédimentaires composées de calcaires dolomitiques, argiles silteuses, et dolomies (épaisseur 22 à 28 m) ;

Pour les besoins de l'étude (cf. § 4.2.2.2), la géologie de la Lettenkohle, telle qu'elle est décrite dans la notice de la carte géologique de Saverne, est détaillée ici. Cette formation correspond à un épisode de régression marine², intercalé entre la sédimentation carbonatée de plate-forme marine du Muschelkalk supérieur et la sédimentation évaporitique du Keuper. A la sédimentation carbonatée, héritée du Muschelkalk supérieur, se surimposent des phénomènes de dolomitisation et s'associent des dépôts détritiques fins, d'origine continentale. Elle est subdivisée en trois termes :

- **t6a.** La Lettenkohle inférieure ou Dolomie inférieure (épaisseur : 6 à 8 m) : ensemble de bancs épais de calcaires dolomitiques et de dolomies, surmonté par un banc d'argile silteuse et feldspathique gris verdâtre, plus ou moins riche en plaquettes dolomitiques de 0,50 m environ, puis enfin ensemble de bancs massifs de dolomie grenue rouille localement gréseuse, épais d'1,50 m.
- **t6b.** La Lettenkohle moyenne :
 - sur les quelques affleurements observés par les géologues lors de l'établissement de la carte géologique, elle débute par un ensemble détritique de 5-6 m d'argiles silteuses feldspathiques légèrement calcaires, grises, à rares niveaux dolomitiques ou gréseux interstratifiés, plus claires ou ocre sur les deux derniers mètres. Cet ensemble se termine par un niveau bariolé, lie-de-vin et vert clair (niveau repère éventuel), argilo-silteux, épais de 0,20 mètre environ ;
 - au-dessus s'observe une série composée d'une alternance de silts argileux noirs ou gris (rarement lie-de-vin), fins feuilletés, feldspathiques (proportion 4/5 pour la région de Saverne), et de dolomies grises à ocre à grain fin parfois gréseuses (proportion 1/5) ;

Dans la Lettenkohle moyenne, la fraction argileuse comprend de l'illite, des minéraux argileux interstratifiés et de la kaolinite, présente de façon épisodique.

- **t6c.** La Lettenkohle supérieure ou Dolomie-limite (épaisseur : 0,50 à 2 m). Elle présente un faciès lumachellique (composé de coquilles) assez caractéristique de teinte beige clair. Les coquilles sont souvent recristallisées assez finement. De la calcite est parfois associée à la dolomie. Sa partie supérieure peut présenter un faciès fin, homogène, pauvre en fossiles. La carte géologique précise qu'elle pourrait être localement discontinue. En effet, au sud et à l'ouest de Lochwiller, elle n'est pas cartographiée (Figure 4).

² Régression marine : baisse du niveau marin

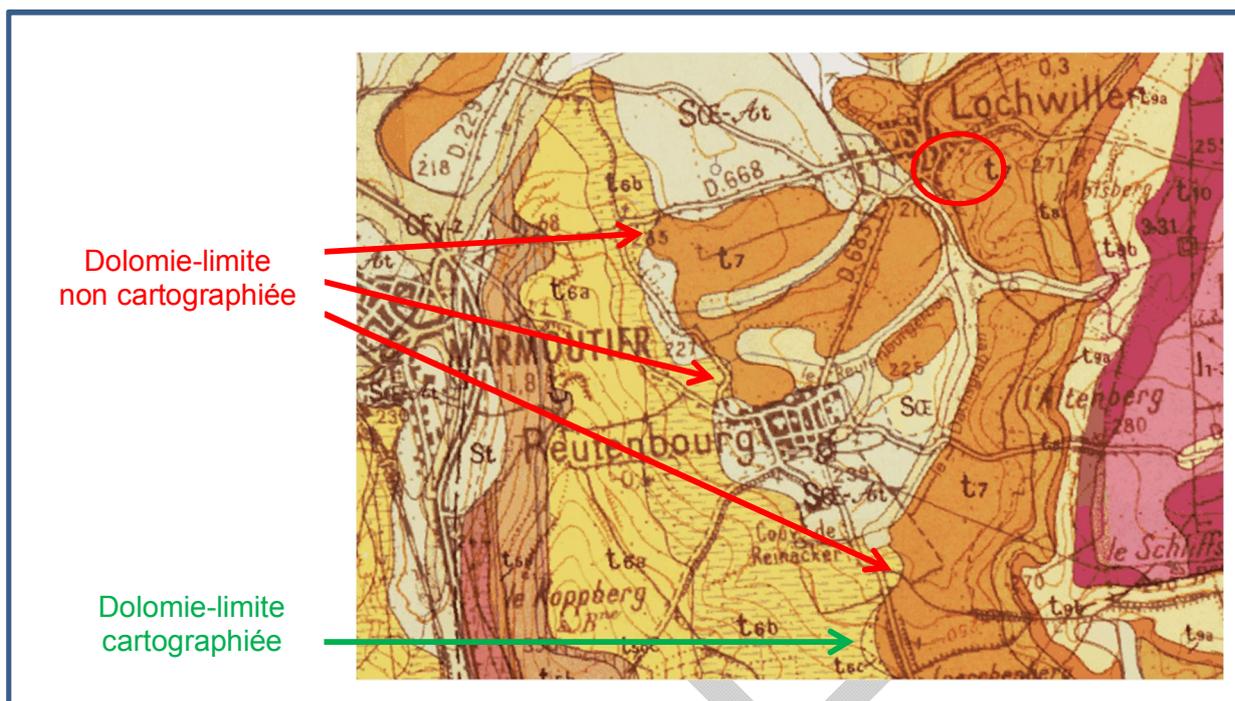


Figure 4 – Mise en évidence du caractère lacunaire de la Dolomie-Limite (t6c) dans le secteur de Lochwiller (Carte géologique BRGM 1/50 000)

- Le Keuper, qui affleure à Lochwiller, apparaît, dans l'est de la France (§ 3.3.1), comme une formation riche en évaporites (roches constituées par différents sels cristallisés) correspondant à une paléogéographie de lagunes sursalées et constituée en grande partie d'argiles silteuses bariolées de teintes vertes et lie-de-vin appelées Marnes irisées. Son épaisseur totale est de 130 à 140 m. Les argiles comprennent une association d'illite, d'interstratifiés illite-chlorite, et de chlorite, souvent en faible quantité.

Le sous-bassement du secteur de Lochwiller, qui date du Keuper inférieur, symbolisé « t7 », (épaisseur de 100 m environ), est constitué, du bas vers le haut, par les formations listées ci-dessous. Les épaisseurs sont données à titre indicatif, elles correspondent à des épaisseurs moyennes tirées des observations sur la région.

- Marnes à pseudomorphoses de sel (épaisseur environ 80 m) : argilites dolomitiques verdâtres finement litées. Ces marnes peuvent contenir des bancs ou des lentilles de gypse ou d'anhydrite ;
- Zellenkalk ou calcaire cellulaire (épaisseur 2 à 4 m), localement absent (il n'est pas cartographié au droit de Lochwiller) (Figure 5) ;
- Marnes irisées inférieures (épaisseur 12 m) : argilites bariolées rouge et vert à nodules de quartz, pouvant contenir de l'anhydrite ou du gypse, à la base ou au sommet de la formation (la carte mentionne que c'est le cas près de Reutenbourg, à quelques kilomètres de Lochwiller) ;
- Marnes à Esthéries (épaisseur 6 m) : argilites dolomitiques verdâtres.

Il n'est pas possible, à la lecture de la carte géologique, de déterminer à quelle formation précisément appartiennent les couches qui affleurent au droit du lotissement de Lochwiller.

Toutefois, les observations des carottes ont permis de recaler la série sédimentaire (cf. § 4.2.2.5)

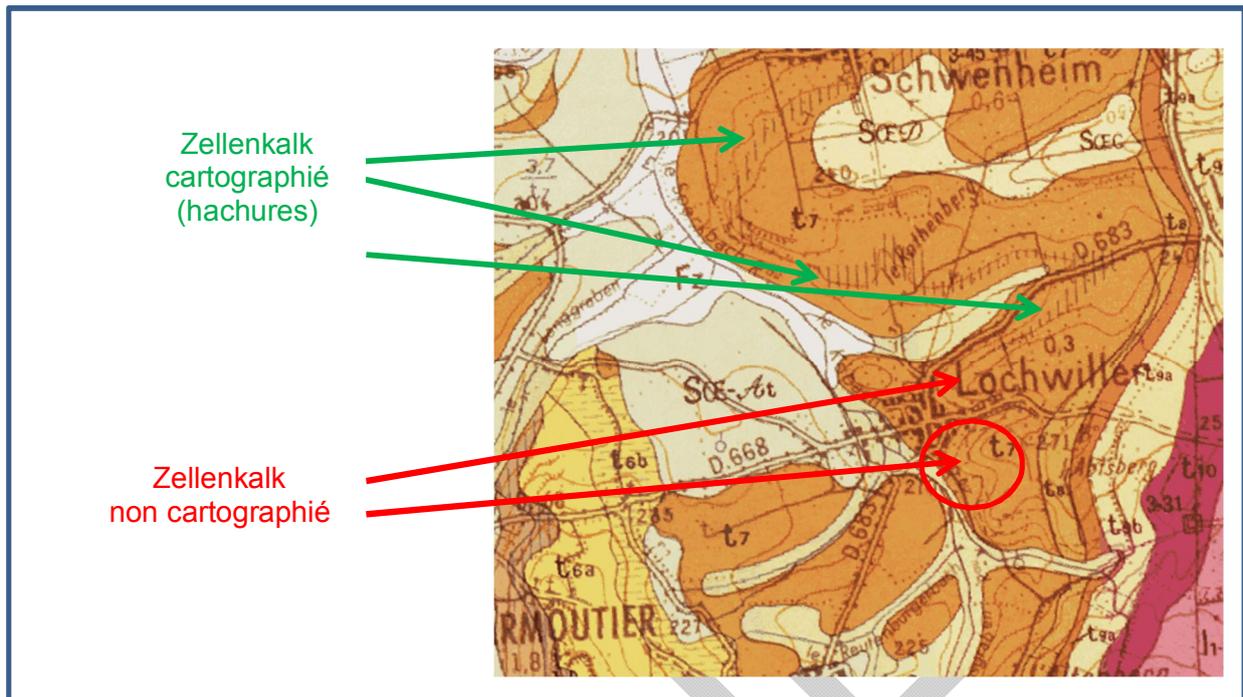


Figure 5 – Mise en évidence du caractère lacunaire du Zellenkalk (hachures verticales à l'intérieur du Keuper inf. t7) dans le secteur de Lochwiller (Carte géologique BRGM 1/50 000)

En contrebas de la colline où est situé le lotissement touché par les désordres, affleurent des matériaux sédimentaires plus récents, de type limons, loess, alluvions à proximité des cours d'eau (alluvions sablo-limoneuses).

L'interprétation de la carte géologique de Saverne indique un pendage plutôt orienté vers l'est. La carte géologique a permis de constituer la coupe géologique du secteur (Figure 6).

La présence d'anhydrite au sein des Marnes irisées inférieures du Keuper de la région de Strasbourg est mentionnée dans la carte géologique de Saverne (BRGM) [1] (cf. § 3.3.2). De plus, l'article de Firtion [17] décrit la présence de gisements de gypse et de gypse/anhydrite dans la région sous-vosgienne à proximité de Strasbourg, entre Waltenheim-sur-Zorn et Flexbourg, communes situées dans les environs de Lochwiller (environ 10 km). Il décrit l'anhydrite en disposition stratifiée mise en évidence par des lits marneux, ou par une gypsification secondaire.

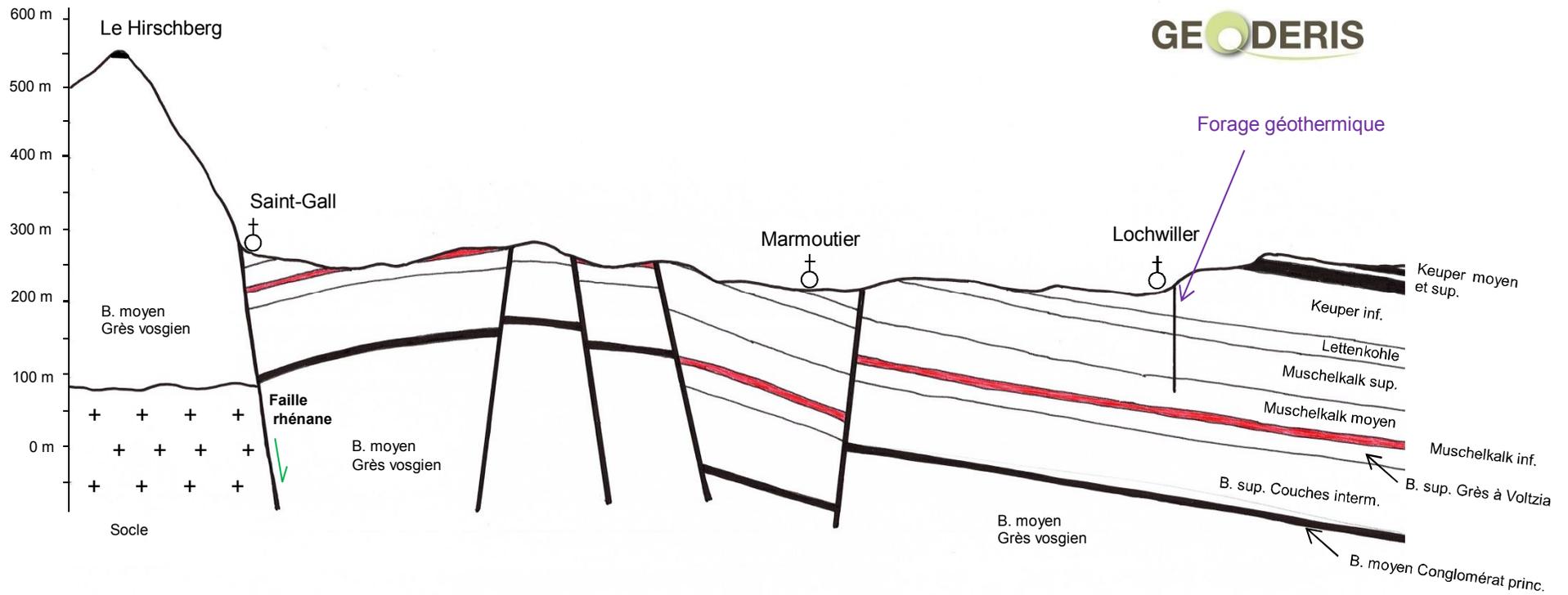


Figure 6 – Coupe géologique du secteur de Saint-Gall-Marmoutier-Lochwiller (d'après carte géologique BRGM 1/50 000 de Saverne) (B. : Buntsandstein)
Exagération verticale x5

PR

4 ACQUISITION D'INFORMATIONS RELATIVES AU SITE DE LOCHWILLER

4.1 Présentation des forages réalisés

4.1.1 Rappel des buts des forages et choix de leur localisation

Cinq forages, dont quatre carottés, ont été réalisés sur le lotissement Weingarten à Lochwiller. Ces forages ont pour but de :

- fournir des carottes de roches permettant une description précise des faciès sédimentaires en présence ;
- permettre la réalisation de diagraphies gamma-ray pour corréliser les forages entre eux et calculer un pendage géologique ;
- fournir des informations sur la répartition, et le mode d'expression de l'anhydrite et du gypse (dispersé, massif) sur toute la colonne, et ainsi permettre de réaliser une évaluation de l'extension spatiale des zones concernées actuellement par les transformations minéralogiques et de leur intensité ;
- fournir des informations sur les argiles, qui seront également étudiées, afin d'évaluer leur rôle dans le phénomène de gonflement de l'anhydrite en fonction de leur nature minéralogique, de l'épaisseur de leurs couches, du mode d'interstratification avec l'anhydrite ;
- réaliser des investigations géotechniques sur les carottes ;
- permettre des prélèvements d'eaux souterraines à des fins d'analyses chimiques et d'analyses de datation ;
- permettre la réalisation de diagraphies conductivité-température des eaux souterraines.

Ils sont, comme proposés initialement (§ 2), répartis comme suit :

- SC4 : à proximité du forage Kandel afin d'avoir un état près du point d'origine des eaux « profondes ». Ce forage permet par ailleurs d'avoir une coupe de référence pour les horizons supérieurs traversés par le forage Kandel et a contribué ainsi à la préparation du rebouchage de ce dernier par le BRGM-DPSM ;
- SC7 : complètement à l'est du lotissement, hors des zones soulevées, de manière à poser une référence géologique de la formation du Keuper ;
- SC5 : à proximité de la zone de soulèvement maximum ;
- SC6 : dans une situation intermédiaire, décalé vers le nord.

Le choix des emplacements s'est effectué afin de pénétrer au minimum dans les parcelles de terrain privées. En dehors du SC4, situé sur la propriété Kandel, les autres sont situés en domaine communal.

La numérotation des forages carottés suit celle initiée par Fondasol lors des premiers forages carottés SC1, SC2 et SC3 réalisés dans le cadre de l'expertise judiciaire.

4.1.2 Déroutement du chantier

La réalisation des forages a eu lieu entre le 7 juillet et le 12 août 2015. Leur emplacement exact est visible sur la figure suivante.

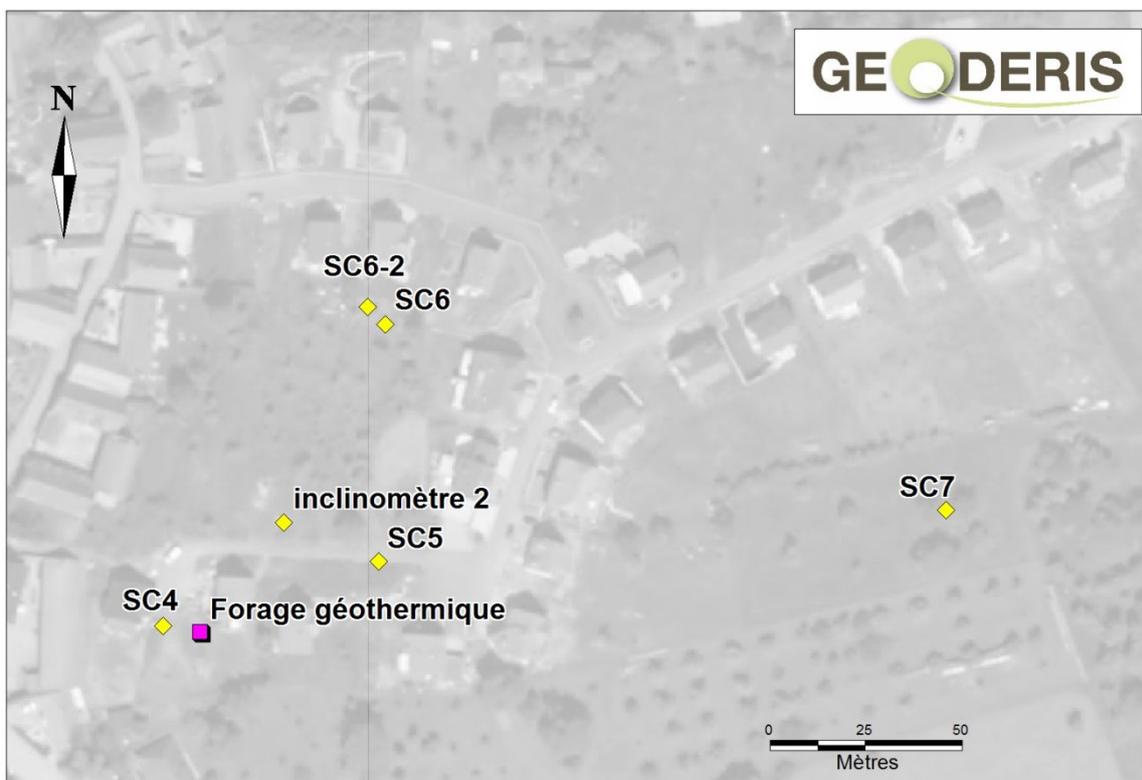


Figure 7 – Localisation des forages réalisés et de l'inclinomètre n°2

Un album photographique de l'ensemble des opérations effectuées est proposé en Annexe 1. De plus, l'Annexe 2 contient les Fiches de suivi de forage avec levé géologique détaillé réalisé par le technicien de GEODERIS en charge du suivi de chantier. Le Rapport de chantier de l'entreprise Ginger-CEBTP est présent en Annexe 11 (volume séparé).

Les forages présentent des profondeurs et des équipements indiqués dans le tableau suivant :

Nom	Profondeur atteinte	Profondeurs crépine	Profondeurs cimentations du fond
SC4	43,4 m	8-19 m	19-43,4 m
SC5	33 m	19,1-25 m	30,9-33 m
SC6	35,2 m	9-15 m	18-35,2
SC6-2	22 m	16-22 m	-
SC7	47,5 m	34-46 m	-

Figure 8 – Profondeurs des forages et de leur équipement

Les coordonnées des ouvrages réalisés sont les suivantes :

Nom	X	Y	Z (tête de l'équipement)	Z (terrain naturel)	Cote fond	Cotes crépine
SC4	1024946,811	6852938,904	220,980	220,310	176,91	201,3-212,3
SC5	1025002,730	6852955,688	230,050	230,050	197,05	205-211
SC6	1025004,388	6853017,895	226,374	225,804	190,60	210,8-216,8
SC6-2	1024999,866	6853022,350	225,330	224,790	202,79	202,8-208,8
SC7	1025149,935	6852969,129	243,851	243,511	196,01	197,5-209,5

Figure 9 – Coordonnées géographiques des forages (Lambert 93 – m NGF)

Des pertes totales de boue de forage sont été signalées dans deux ouvrages : SC4, à proximité du forage géothermique, à partir de 9 m (soit 211 m NGF environ), et SC7, dans le verger surmontant le lotissement, à partir de 39,10 m (soit 204,4 m NGF).

La diagraphie gamma-ray du forage SC4 a pu avoir lieu avant le rebouchage du fond du forage et la pose de l'équipement. Les diagraphies gamma-ray des quatre autres ouvrages forés et de l'inclinomètre du haut ont été réalisées en fin de chantier, le 27 août 2015.

Un forage complémentaire SC6-2 a été réalisé, afin d'obtenir un complément d'information quant à la présence d'eau dans le secteur situé en aval pendage du gonflement, permettant de disposer d'un « double » piézomètre. Le premier forage SC6 a été crépiné entre 9 et 15 m de profondeur. Le fond a été soigneusement rebouché. Le technicien GEODERIS en charge du suivi des forages a observé que les terrains étaient humides jusqu'à 22 m de profondeur, au-delà ils semblaient plus secs. Un second forage crépiné sur une tranche inférieure (16-22 m) a été réalisé à quelques dizaines de mètres du premier. Cela a permis d'éviter de poser une crépine sur une profondeur trop importante, ce qui aurait pu avoir des conséquences dommageables, notamment la création d'un drain vers des terrains peut-être non impactés par des circulations d'eaux et par le phénomène de gonflement de l'anhydrite.

4.1.3 Diamètres de forages et description des équipements

Les coupes des équipements des piézomètres sont placées en Annexe 3.

Un avant-trou, pour chaque forage, sauf pour le SC6-2, a été foré, en $\varnothing 254$ mm, après une première phase de carottage en $\varnothing 114$ mm. A l'intérieur de l'avant-trou, un tube en acier de $\varnothing 168$ mm a été scellé, afin d'isoler totalement les 7 premiers mètres des forages de toute infiltration d'eau. Les carottages ont ensuite été poursuivis en $\varnothing 122$ mm, et ré-alésés en $\varnothing 154$ mm.

Le fond des forages a été rebouché par un coulis de ciment expansif, afin d'éviter définitivement toute circulation d'eau sur les niveaux qui ne devaient pas être équipés en crépine, et qui sont peut-être exempts de circulations d'eaux. Au-dessus de ce niveau, un bouchon de sobranite de 2 m a été ajouté, afin de parfaitement sceller le bouchon. Il s'agit d'une argile qui se présente sous la forme de granulés, qui réagissent en présence d'eau en gonflant, et en générant ainsi une étanchéité parfaite.

Les forages ont ensuite été équipés en piézomètres, c'est-à-dire qu'ils contiennent chacun une crépine de $\varnothing 64-75$ mm, destinée à capter les eaux souterraines sur la tranche de profondeur choisie. Autour de la crépine est placé un massif filtrant, composé de graviers siliceux, et destiné à filtrer les particules argileuses pour éviter qu'elles ne bouchent les ouvertures de la crépine.

Au-dessus et parfois au-dessous (dans l'objectif d'obtenir des diagraphies gamma-ray plus profondes) des niveaux crépinés, du tube plein, donc non perforé, a été placé. Autour de ce tube, et au-dessus du massif filtrant, un nouveau bouchon de sobranite a été placé sur plusieurs mètres, additionné d'un remplissage par du coulis de ciment expansif jusqu'en surface.

Des capots métalliques ont été posés sur les forages SC4, SC6, SC6-2 et SC7. Une bouche à clef au ras du sol a constitué la fermeture du forage SC5, situé sur la chaussée.

4.1.4 Développement des piézomètres

Les forages ont été développés par air-lift le 17 août 2015. La réalisation d'un air-lift consiste à injecter de l'air comprimé dans le fond du forage, afin de de décoller les impuretés pouvant être liées à la crépine, et d'expulser les fluides présents (eau + additifs de forage) à l'extérieur, sous l'effet de la pression. Les opérations ont eu les résultats suivants :

	Niveau piézométrique /sol				
	SC4	SC5	SC6	SC6.2	SC7
Avant "Air Lift"	11,17 m	21,1 m	14,17 m	15,23 m	20,24 m
Intermédiaire	11,17 m	21,1 m	14,15 m	18,13 m	31,24 m
Fin "Air Lift"	11,19 m	21,1 m	14,15 m	18,33 m	32,25 m
Remarques	Aucune sortie d'eau	Importantes sorties d'eau	Aucune sortie d'eau	Sorties d'eau modérées	Importantes sorties d'eau

Figure 10 – Importance des sorties d'eau sur les forages suite aux opérations d'air-lift

L'absence de sorties d'eau peut indiquer que la ré-alimentation en eau des piézomètres est très mauvaise, du fait de l'imperméabilité des terrains. En conséquence, il a été réalisé des pompages, en vue de purger les piézomètres. Cela a été effectué le 25 août 2015 sur les forages SC4, SC6 et SC6-2.

	Niveau piezo /sol		
	SC4	SC6	SC6-2
Avant pompage	11,21	14	15,4
Fin pompage	18,9	17,85	21,9
Fin + 30 minutes	16,35	14,8	18,53
Fin + 1h	15,37	14,4	17,32
Fin + 2h	12,69	14,05	16,21
Remarques	Débit de pompage 5l/min. 15 minutes pour assécher le forage.	Débit de pompage 5l/min. 4.5 minutes pour assécher le forage.	Débit de pompage 3.8l/min. 8 minutes pour assécher le forage.

Figure 11 – Débits de pompage de purge dans les forages et suivi piézométrique

Les informations obtenues quant à la géologie, la pétrographie, la minéralogie, la géotechnique et la nature chimique des eaux souterraines sont présentées dans les

paragraphes suivants. L'Annexe 4 contient des fiches de synthèse par forage comprenant la diagraphie gamma-ray, les photographies des carottes, une description pétrographique synthétisée, en mettant en évidence les proportions d'évaporites et leurs différentes formes de cristallisation.

4.2 Données géologiques et minéralogiques

4.2.1 Diagraphies gamma-ray : calcul du pendage géologique des couches

4.2.1.1 Principe des diagraphies gamma-ray

Des diagraphies gamma-ray ont été réalisées sur les forages. Il s'agit de mesures de la radioactivité naturelle des terrains traversés par un forage, à l'aide d'une sonde qui est descendue, puis remontée, entre la surface et le fond du forage.

Cette radioactivité naturelle est provoquée le plus souvent par l'uranium, le thorium et le potassium 40. Les résultats de ces diagraphies permettent d'apporter des informations lithologiques. Les argiles se montrent le plus souvent fortement radioactives, pour plusieurs raisons : si elles sont potassiques (il a été vu au § 3.1 que l'illite est une argile potassique), si elles s'accompagnent de minéraux accessoires radioactifs, ou si elles ont absorbé, dans leur espace interfoliaire, des cations comportant uranium et thorium, ce qui est fréquent [19]. Les principales roches peuvent être classées selon leur degré de radioactivité. Pour ce qui concerne les lithologies rencontrées à Lochwiller, on peut mentionner les argiles (radioactivité élevée), et les évaporites sans potassium, halite, anhydrite (radioactivité faible). Les calcaires et dolomies sont également à radioactivité faible.

Les mesures peuvent se réaliser sur trous tubés ou non, et/ou remplis de n'importe quel fluide.

4.2.1.2 Résultats des diagraphies réalisées sur les forages de Lochwiller

Tout d'abord, il convient de préciser qu'une diagraphie dans le forage SC4 avant son équipement a été réalisée, puis une diagraphie dans chaque forage équipé, y compris l'inclinomètre 2 (en face de la maison Belhadj).

L'Annexe 5 présente l'ensemble des résultats de mesures sous la forme de graphiques, comprenant une première courbe (en vert clair) des mesures en remontée de la sonde (cela permet de caler le fond du forage en termes de profondeur), et la seconde (en vert foncé) également en remontée, cette fois-ci en moyenne glissante afin de lisser les courbes et de les rendre plus facilement interprétables. En vue d'interpréter les courbes obtenues, l'équipement des forages a été ajouté à côté des graphiques.

Comme il pouvait être attendu, si l'on compare les courbes obtenues aux terrains rencontrés (voir les descriptions des carottes de roches en Annexes 2, et 4), les diagraphies gamma-ray réalisées permettent de très bien distinguer les niveaux argileux (pics de signal), des niveaux évaporitiques (chutes de signal).

En commentaires préliminaires sur les variations lithologiques mises en évidence par les diagraphies, il est possible de remarquer que les cinquante premiers centimètres sont peu émetteurs, probablement du fait de la présence de remblais, terrains remaniés, ou de limons de surface.

Sous cette première couche, le signal augmente, mais reste relativement constant sur les premiers mètres (environ 7-10 m pour les forages SC4, SC5, SC6 et 6-2, SC7, et plutôt 5 m sur l'inclinomètre n°2). Cela pourrait être dû à l'équipement des forages. En effet, ceux-ci comprennent, outre les crépines, et les graviers quartzeux, qui sont en principe neutres d'un point de vue radioactif, un remplissage de coulis de ciment, de sobranite, qui est une argile donc qui peut réagir aux mesures gamma-ray, ainsi qu'un tube d'avant-trou de sept mètres de profondeur. Cette longueur du tube n'est pas sans rappeler celle des résultats de gamma-ray relativement constants observés ci-dessus. Toutefois, la comparaison des courbes obtenues sur le forage SC4 nu et sur le forage équipé (accessible sur ses 19 premiers mètres) semble montrer que la radioactivité naturelle des terrains est bien constante sur les sept premiers mètres. On notera, en outre, que les signaux enregistrés sur ce même forage avant et après équipement ne sont pas exactement identiques, mais ne présentent pas non plus de différences majeures. Il serait donc possible de considérer que l'équipement des forages n'a pas, ou très très peu, d'influence sur les mesures.

Ceci considéré, il est possible que la relative constance des signaux émis sur les premiers mètres de terrains mette en évidence la disparition des évaporites sur cette couche de subsurface, suite à des circulations d'eaux les ayant dissoutes. Nous reviendrons sur ce point plus loin concernant la description des carottes (§ 4.2.2) et les analyses minéralogiques (§ 4.2.3), qui semblent confirmer cette hypothèse.

En dessous de ces premiers mètres, les variations de signal sont nettement plus marquées, et permettent de bien séparer visuellement les passages plus argileux des passages plus évaporitiques, plus calcaires voire plus dolomitiques. Cela permet d'envisager des corrélations entre les forages.

4.2.1.3 Corrélations entre diagraphies

Les forages réalisés à Lochwiller étant peu distants les uns des autres, il est donc en principe possible de corréler les diagraphies. Dans notre cas, cette corrélation est rendue difficile car les forages ne recoupent pas complètement les mêmes niveaux sédimentaires, du fait du pendage géologique et du fait de la topographie, qui ajoute une épaisseur de terrains supplémentaires quand elle est plus élevée, et du fait de la disparition possible des bancs évaporitiques sur les premiers mètres sous la surface.

L'Annexe 5 propose des corrélations, marquées par des lignes colorées. Ces corrélations sont établies en fonction des événements argileux et évaporitiques observés sur les courbes, sur les descriptions géologiques des terrains (cf. § 4.2.2), mais se basent également sur les observations de pendage réalisées sur le terrain, notamment sur les affleurements visibles sur les propriétés Matjeka (Figure 12) et Schmitz.



Figure 12 – Pendage apparent (nord-nord-est) sur l'affleurement de la propriété Matjeka

4.2.1.4 Calcul du pendage géologique

Un pendage nord-est compris entre 7 et 10° avait été proposé dans le document GEODERIS de 2014 [20], d'après les observations de terrain.

L'ensemble des observations effectuées sur les diagraphies a conduit aux corrélations proposées dans l'Annexe 5, puis aux calculs de pendage suivants :

- N111°E / 7,3°NE sur corrélation SC4, SC5 et SC6-2
- N112°E / 7,3°NE sur corrélation SC4, SC6-2 et SC7.

Ces calculs sont cohérents avec le pendage évalué en 2014. Ce pendage est représenté sur la Figure 13. Toutefois, il n'est pas complètement en accord avec la carte géologique, dont l'interprétation fournirait plutôt un pendage vers l'est (cf. § 3.3.2).

Des corrélations géologiques sont proposées plus loin dans l'étude (§ 4.2.2.5). Ces corrélations sont basées sur un banc qui semble pouvoir servir de repère. Il s'agit d'une sorte de brèche intra-formationnelle à remplissage gypseux rose ou orangé. Le calcul du pendage sur le mur de ce banc, observé sur les carottes de SC5, SC6 et SC7, indique un pendage orienté N112°E / 6,4°NE, ce qui est très proche des calculs précédents et semble valider la corrélation des diagraphies gamma-ray.

Les essais de corrélation sur la couleur des marnes et argillites n'ont pas fourni de résultat satisfaisant. Il semblerait que les couleurs varient d'un forage à l'autre, en particulier quand les argillites et marnes sont bariolées.

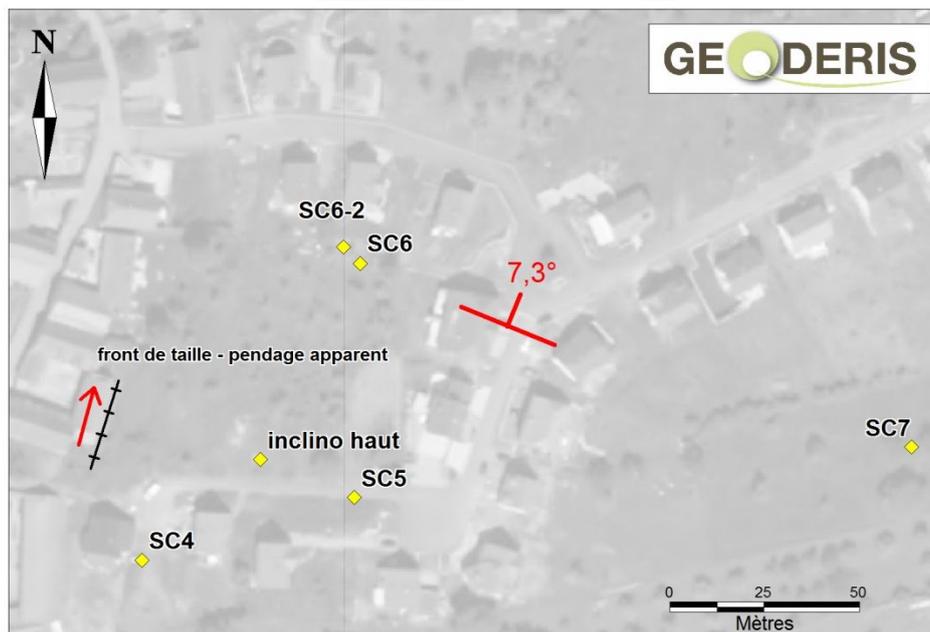


Figure 13 – Vue du pendage calculé d'après les corrélations des diagraphies gamma-ray réalisées sur les forages SC4, SC5, SC6-2 et SC7

4.2.2 Description pétrographique et structurale des carottes de forages

4.2.2.1 Observations générales

Les forages ont mis en évidence la présence de dépôts argilo-évaporitiques : argillites et marnes de teintes variées, bariolées, vertes, rouges, grises, ou noires, associées à des

niveaux d'anhydrite et de gypse et à des intercalations plus dolomitiques.

Les faciès se présentent, sous la surface, et parfois plus en profondeur, sous la forme de couches décimétriques à pluri-métriques de marnes ou d'argilites (parfois plastiques) bariolées souvent sans litage apparent (Figure 14), comprenant quelques passées d'évaporites granulaires ou poudreuses ou quelques rares nodules évaporitiques.



Figure 14 – Echantillon de terrains argileux plastiques (échantillon SC4-2 vers 3,5 m à droite, et SC7-12 vers 32 m à droite)

Ces premiers faciès passent plus en profondeur à des faciès beaucoup plus finement lités, parfois feuilletés, ou parfois très compacts (Figure 15).



Figure 15 – Exemple de terrains très compacts à tendance dolomitique (échantillon SC4-15 vers 21 m) à gauche et de terrains finement laminés qui se délittent plus facilement à droite (échantillon SC6-14 vers 32 m)

Il s'agit d'alternances de lamines argilo-marneuses grises à noires, ou gris-vert, et de lamines évaporitiques, d'épaisseurs comprises entre quelques mm et environ un cm.

Ces faciès rencontrés plus profondément dans les forages présentent également des nodules évaporitiques. Ceux-ci sont de forme régulière, sphérique, ovoïdale, ou lenticulaires aux contours très démarqués de l'encaissant argilo-marneux, ou au contraire de forme quelconque, en taches et en nuages aux contours imprécis. Leur couleur varie du blanc au gris, au rose et à l'orangé.

On note également à certains niveaux la présence de micro-fractures verticales à sub-verticales (Figure 16), et même parfois relativement inclinées, d'ouverture millimétrique, à remplissage évaporitique. Certaines fractures d'ouverture plutôt centimétrique à pluricentimétrique contiennent des matériaux à l'aspect bréchique, mêlant débris de matrice avec cristallisations évaporitiques (exemple vers 32 m et vers 37 m dans SC4, très fréquent entre 39 et 44 m dans SC7) blanches et parfois rosées.



Figure 16 – Exemple de fractures à ouverture pluricentimétrique et à remplissage évaporitique (à gauche SC4 vers 37 m, à droite SC7 vers 40 m)

Les descriptions précises des faciès rencontrés sont présentées dans les fiches de suivi de forages (Annexe 2). Une synthèse est proposée dans les feuilles descriptives des caractéristiques de forages, présentées en Annexe 4.

Les paragraphes suivants résument les lithologies rencontrées dans les quatre forages. Le lecteur peut se reporter aux photos des carottes présentées en Annexe 6, et aux fiches constituées sur les échantillons, reportées en Annexe 7.

4.2.2.2 Forage SC4

La profondeur du forage SC4 a été plus importante que celle prévue initialement d'une vingtaine de mètres, ceci dans deux objectifs : le premier était d'effectuer une reconnaissance de la présence, ou non, d'évaporites en-dessous du niveau limite initialement retenu pour l'étude (cf. § 2). Ce niveau avait été retenu car la morphologie du bombement laisse plutôt penser à un gonflement à une profondeur comprise entre 0 et 20 m. Le second objectif de cet approfondissement était de recalculer la série sédimentaire, en atteignant la base du Keuper inférieur, et donc le toit de la Lettenkohle. Celui-ci était attendu vers 33 m de profondeur (cf. [20]). La Dolomie-limite, qui marque la transition entre le Keuper et la Lettenkohle, est composée d'un banc dolomitique beige à faciès lumachellique (composé de coquilles) épais de 0,5 à 2 m. Elle était recherchée lors du forage, même si la carte géologique la montre parfois lacunaire dans le secteur de Lochwiller (cf. § 3.3.2). Sous ce banc-repère se rencontrent théoriquement des silts argileux noirs ou gris, fin et feuilletés, puis des argiles silteuses légèrement calcaires ou dolomitiques, voire gréseuses. Aucune évaporite sulfatée n'est signalée dans la notice de la carte géologique dans la Lettenkohle, pourtant il sera vu plus loin que des marnes noires à évaporites³ ont été rencontrées jusqu'à 43,5 m, profondeur à laquelle le forage a été stoppé. Cet arrêt a été décidé afin de ne pas prendre de risques quant à la proximité de l'aquifère sous pression rencontré par le forage « Kandel » (venue d'eau sous pression à 64 m) et considéré comme l'évènement déclencheur du sinistre. Il est donc fortement probable que la base du Keuper n'ait pas été tout-à-fait atteinte. L'autre hypothèse est que localement, des niveaux évaporitiques sulfatés soient déjà présents dans la Lettenkohle moyenne.

Les terrains rencontrés dans ce premier forage sont les suivants. Ils débutent par 5 m d'argile et d'argile marneuse marron puis gris-vert, sans observation d'évaporites, ni de litage. Quelques petits nodules sont présents vers 1,5 m, d'apparence calcaire. Les analyses minéralogiques montrent la présence de gypse à hauteur de 18% dans l'échantillon prélevé à ce niveau (SC4-1).

L'argile marneuse gris-vert se poursuit jusqu'à 11 m (cf. échantillon SC4-2). Entre 5 m et 8,5 m, la présence d'évaporites est rare : des lits de petits nodules poudreux très fins ou granuleux sont notés entre 5,2 et 5,4 m, ainsi que de minces lits d'évaporites de 2-3 cm d'épaisseur à 6,3 m, 7,3 m et 7,8 m (cf. échantillon SC4-3), incluant quelques nodules granuleux de 2 cm pour ce dernier niveau.

³ Les analyses minéralogiques ont confirmé la présence de 35% d'anhydrite, 21% de bassanite et 7% de gypse primaire dans l'échantillon SC4-19 prélevé à 41,6 m (cf. Annexe 1).

A partir de 8,5 m, l'argileuse marneuse gris-vert se trouve en alternance avec des lits d'évaporites jusqu'à 10,8 m, avec des proportions pour ces dernières comprises en 10 et 50 % volumiques. Leur apparence est blanche, parfois rose, avec des passages translucides ou fibreux. Les lits mesurent quelques mm d'épaisseur le plus souvent, 2-3 cm parfois (cf. échantillons SC4-7, SC4-5, SC4-6).

Cinq mètres de marnes bariolées gris-vert localement rougeâtres suivent, de 10,8 m jusqu'à 15,9 m, comprenant des intercalations d'évaporites (20-30%) blanches millimétriques, jusqu'à 2 cm d'épaisseur. Un litage fin est relevé. Vers 14 m, des nodules blanc-rose de 2-3 cm sont observés (cf. échantillon SC4-12).

A partir de 15,9 m, de la marne gris foncé a été observée jusqu'au fond du forage, à 43,4 m. Cette marne comprend des passages plutôt feuilletés, et des passages plus massifs (marne dolomitique), et se trouve en alternance avec des lamines blanches, grises, parfois roses, dans des proportions comprises entre 10 et 70 %. Ces lamines s'avèreront, à l'analyse chimique, composées essentiellement de sulfates (anhydrite, bassanite, et/ou gypse) et de dolomite. Le lecteur peut se référer aux échantillons à partir de SC4-20.

Des fractures sub-verticales sont observées entre 24,4 et 24,7 m, entre 30,0 et 30,2 m, entre 32,10 et 32,30 m, entre 34,30 et 34,40 m, entre 37,0 et 37,20 m, vers 38,60 m et vers 40,8 m. Le remplissage est d'apparence gypseux, blanc ou rose, parfois bicolore au sein d'une même fracture, ce qui témoignerait de phases de cristallisations successives, donc de phases d'ouvertures des fractures multiples.

4.2.2.3 Forage SC5

Les terrains rencontrés dans le forage SC5 débutent par 5,5 m d'argile brun-rouge à bariolée, massive, sans litage. Deux fins niveaux comprenant des nodules granulaires d'évaporites de 3-4 cm ont été relevés à 2,6 et 2,8 m, ainsi qu'un lit d'évaporites granulaires à 3,8 m (cf. échantillon SC5-1).

De 5,5 m à 14,8 m, de l'argile marneuse bariolée est présente (cf. échantillon SC5-3, SC5-5, SC5-4). Elle comprend des lits d'évaporites granulaires, assez minces, tous les 30-40 cm environ ((cf. échantillon SC5-2), sauf entre 12,5 et 14,5 m, où l'argile marneuse reste massive.

Entre 14,8 et 18,6 m, on observe une argile marneuse plutôt gris-vert, à passées rougeâtres, massive, dans laquelle apparaissent de très rares lits poudreux ou granulaires d'évaporites (cf. échantillons SC5-6 et SC5-7). Le pourcentage d'évaporites est estimé à quelques % uniquement, depuis la surface.

La transition est brutale à 18,6 m vers une roche plus massive composée de marnes gris-vert et d'évaporites en lamines millimétriques à pluri-centimétriques à hauteur de 10-20 %, jusqu'à 22,6 m (cf. échantillons SC5-9, SC5-10). Entre 21 et 22,6 m, la couleur est plutôt bariolée.

Entre 22,6 et 23,5 m apparaît une zone qui semble fracturée, et remplie de gypse (83 % de gypse, 1 % d'anhydrite d'après les analyses minéralogiques) rose-orangé d'apparence saccharoïde (cf. échantillon SC5-11).

Sous ce banc, on note la présence de marnes gris foncé en alternance avec des évaporites, sous la forme de lamines millimétriques à pluri-millimétriques voir centimétriques, à passage massifs (SC5-12, SC5-13, SC5-14), ou plus feuilletés (SC5-18, SC5-15), jusqu'au fond du forage à 33,0 m. Le pourcentage d'évaporites serait de l'ordre de 10 à 30 % selon les bancs.

Entre 25 et 28 m, la teinte grise des marnes comprend des passages plus rouges. Des fractures à remplissage gypseux apparaissent entre 25-27 m.

4.2.2.4 Forage SC6

De la surface jusqu'à 12,75 m, de l'argile marneuse est observée. De teinte brun-rouge, elle comprend des passages bariolés (cf. échantillons SC6-3, SC6-4). Elle est massive, sans litage apparent, et présente quelques niveaux d'évaporites sous forme poudreuse (cf. échantillon SC6-1, SC6-2), voire granulaire. A partir de 9,4 m, des nodules sont notés.

Entre 12,75 et 17,35 m, on observe la présence d'argile gris-vert localement silteuse, comprenant de rares lits d'évaporites poudreuses blanches.

A partir de 17,35 m et jusqu'à 25,8 m, les terrains sont composés de marne gris foncé plutôt feuilletée, à passages évaporitiques importants (10-30 % volumiques) sous formes de lamines blanches ou roses, et de nodules (cf. échantillons SC6-6, SC6-5, SC-17, SC6-8, SC6-7, SC6-9, SC6-11, SC6-10). Des fractures sub-verticales sont notées à certains niveaux. Le remplissage est gypseux, blanc ou rose.

Un niveau fracturé rempli de minéraux rose-orangé massif est relevé entre 25 et 25,8 m. Il ressemble à une sorte de passage bréchique où les cristallisations auraient comblé les cavités en cristallisant à l'intérieur. Les analyses minéralogiques montrent sur ce niveau dont l'échantillon porte le numéro SC6-10, 11 % de bassanite et 74 % d'anhydrite.

Entre 25,8 m et le fond du forage à 35,2 m, se trouvent des roches massives composées de marne gris foncé et de lamines blanches, qui constituent environ 20-40 % du volume (cf. échantillons SC6-12, SC6-13, SC6-15, SC6-14 et SC6-16). De nombreux nodules sont présents, ainsi que du remplissage de fractures toujours sub-verticales.

4.2.2.5 Forage SC7

Les terrains recoupés par le forage SC7 débutent par 6 m d'argile marneuse et de marnes argileuses gris-vert contenant très peu d'évaporites : quelques lits discontinus poudreux, de petits nodules ou granules.

A partir de 6 m, et jusqu'à 9,8 m, on note les mêmes marnes gris-vert, à passées rouges, comportant toujours quelques lits d'évaporites.

Dès 9,8 m, les marnes sont bariolées et se trouvent en alternance avec des lits d'évaporites millimétriques et des passages nodulaires, ceci jusqu'à 39,2 m. Dans ces niveaux, les marnes peuvent prendre des teintes très rouges (cf. échantillon SC7-2, SC7-11, SC7-12, SC7-3, SC7-13), ou sont parfois grises à gris-vert (cf. échantillon SC7-9, SC7-10). Les évaporites se trouvent en proportions estimées entre 10 et 30 % globalement. On note des passages plus riches, notamment vers 26 m (50 %), ou vers 26,5 m (80 %).

Un niveau d'apparence calcaire, et comportant de petites cavités pluri-millimétriques a été relevé entre 12,8 et 12,9 m (cf. échantillon SC7-1). Sa nature calcaire, ainsi qu'une composante siliceuse (silts ?) ont été détectées par l'analyse minéralogique. Il est fortement probable que ce niveau décimétrique corresponde au Zellenkalk mentionné dans la notice de la carte géologique comme un passage de calcaire cellulaire peu épais (0,5 – 2 m), parfois lacunaire (cf. § 3.3.2). Le Zellenkalk a été échantillonné par nos soins à 1,5 km au nord-ouest de Lochwiller (cf. photographie 51 en Annexe 1).

A 39,2 m, une transition très brutale est observée, vers des marnes à passées grises et rouges comportant des lits nombreux d'évaporites, plus importants en volume qu'auparavant

(20-40 %) (cf. échantillon SC7-4, SC7-5), et dont la caractéristique principale est l'état de fracturation. Une multitude de micro-fractures verticales à sub-verticales sont observées, et se démarquent fortement de l'encaissant par leur remplissage blanc certainement gypseux. Les fractures sont surtout présentes entre 39,2 m et 40,6 m (SC7-14), et entre 42 et 45 m (SC7-6), puis enfin à partir de 46,3 m, jusqu'au fond du forage à 47,5 m. L'absence de fracturation au-dessus de 39,2 m semble montrer que cette fracturation est synsédimentaire, sinon les terrains sus-jacents seraient affectés également. Elle est certainement due à une période d'émersion des terrains au cours du Keuper.

Un important niveau d'apparence bréchique apparaît entre 44,25 m et 44,9 m. La cavité est remplie de cristallisations oranges, comportant un litage sub-horizontale visible (cf. échantillon SC7-16), ce qui irait dans le sens d'une hypothèse de brèche intra-formationnelle synsédimentaire.

Les marnes grises à rouges décrites ci-dessus, à partir de 39,2 m, deviennent de couleur grise uniquement à partir de 46,75 m (cf. échantillon SC7-15), et jusqu'au fond du forage, à 47,5 m.

4.2.2.6 Hypothèse de la présence d'une zone altérée

On peut observer que, pour chaque forage, les premiers mètres sous la surface ne comportent que très peu d'évaporites (quelques %). Les couches concernées présentent les profondeurs suivantes :

- SC4 : 0-8,5 m (jusqu'à 211,8 m NGF) ;
- SC5 : 0-18,6 m (jusqu'à 211,45 m NGF) ;
- SC6 : 0-17,35 m (jusqu'à 208,45 m NGF) ;
- SC7 : 0-9,8 m (jusqu'à 234,0 m NGF).

Pour les forages SC4, SC5, et SC6, cela correspond aux profondeurs pour lesquelles la radioactivité naturelle mesurée par les diagraphies gamma-ray est d'amplitude relativement faible, cela a été souligné au § 4.2.1.2. On remarque en outre, d'après les corrélations proposées sur les diagraphies gamma-ray au § 4.2.1.3 (Annexe 5), que plusieurs mêmes niveaux peuvent être recoupés par plusieurs forages, en position plus ou moins proche de la surface, et qu'ils présentent, pour certains et selon les forages, des quantités variables d'anhydrite et de gypse. On peut prendre pour exemple, si l'on considère que les corrélations proposées sont justes, le niveau compris entre les repères bleu clair et vert (Annexe 5). Dans le forage SC4, ce niveau est situé entre 3 m et 6 m de profondeur, il ne comporte pas d'évaporites jusqu'à 5,2 m. Ensuite on observe deux lits minces d'évaporites poudreuses à 5,2 et 5,4 m puis plus rien jusqu'à 6 m. Dans le forage SC5, ce même niveau est profond de 17,5 à 20,5 m environ, et comporte environ 20 % d'évaporites, ce qui est le cas également dans les forages SC6 et SC7 où, à des profondeurs respectives de 18-21 m et 39,5-42,5 m, il comprend 20 % et 20-40 % d'évaporites respectivement. Il est donc fortement probable que les niveaux proches de la surface listés plus haut aient été altérés par suite des transformations et des dissolutions des sulfates, en lien avec des circulations d'eau de subsurface. Ce phénomène est mentionné dans la bibliographie, le Keuper est alors désigné comme « *leached Keuper* » ou « *weathered Keuper* » [21] [22].

4.2.3 Données minéralogiques

4.2.3.1 Techniques d'analyses

Les analyses minéralogiques ont été confiées au laboratoire Géoresources de l'Ecole Nationale Supérieure de Géologie de Nancy. Les espèces minérales ont été identifiées tout d'abord sur lames minces, en lumière polarisée, puis en lumière polarisée et analysée. 300 points de comptage, sur chaque lame mince de dimensions 30 x 45 mm ont été réalisés, en

vue d'estimer la part volumique de chaque minéral en présence. Les phases argileuses ont été séparées physiquement des autres phases minérales, puis analysées par DRX (diffraction des rayons X), afin de les distinguer.

Géoressources a précisé qu'il n'était pas possible, ou très difficilement, de distinguer la bassanite du gypse par l'analyse optique des lames minces. Les proportions relatives de ces deux phases ont été évaluées suite à des analyses en DRX complémentaires.

Les résultats bruts sont consultables dans le rapport de Géoressources en Annexe 12. Elles sont mises en forme et accompagnées de photographies en Annexe 7 dans les fiches relatives à chaque échantillon.

4.2.3.2 Les différents minéraux en présence

Les analyses minéralogiques ont montré que les roches extraites des forages réalisés à Lochwiller étaient formées en proportions variables de minéraux évaporitiques (sulfates de calcium uniquement, on note l'absence de chlorures), de carbonates (dolomite, magnésite, calcite), et de particules détritiques silico-alumineuses et siliceuses (minéraux argileux et quartz). Leurs composants résultent de phénomènes variés : décantation pour les particules détritiques, précipitation chimique (cristallisation de l'anhydrite ou de gypse primaire), ou recristallisation (bassanite et gypse secondaire).

- **Les argiles**

Les minéraux argileux ont été identifiés par diffraction des rayons X après séparation des autres phases minéralogiques. Il s'agit de l'illite, des smectites et de la chlorite, minéraux présentés au chapitre 3.1.

La répartition des différents minéraux argileux, et de ces minéraux par rapport aux autres phases minérales, est présentée dans les graphiques des figures suivantes (Figure 17 et Figure 18). Le trait pointillé rouge indique la limite de la zone altérée, où les évaporites semblent avoir disparu (phénomène évoqué au § 4.2.1.2, au § 4.2.2.6 et plus loin au § 4.2.3.3).

Si l'on s'intéresse tout d'abord à la proportion d'argiles au sein des terrains pris dans leur globalité, elle est plus importante dans la zone altérée, que dans le reste des terrains (cas des forages SC4, SC5 et SC6. Aucune analyse minéralogique n'est disponible dans la zone altérée de SC7). Elle représente environ 35 à 55 % de la roche dans la zone altérée, et plutôt 10 à 20 % dans la zone intègre. Il est possible d'ajouter d'ores et déjà que la part d'évaporites est faible dans la zone altérée, à hauteur de quelques %, et beaucoup plus importante dans la zone intègre, entre 30 et 85 % généralement. De même, la part des carbonates est relativement faible en zone intègre (10-20 % généralement), et plus importante en zone altérée (40-60 % généralement), certainement du fait de la disparition des évaporites.

Ensuite, il apparaît, concernant la part de chaque argile au sein de la phase argileuse, que les smectites sont majoritaires. Ce sont des argiles gonflantes, cela a été décrit au § 3.1. Elles représentent environ 50 % de la phase argileuse. En seconde position vient l'illite, sur un quart à un tiers du volume de la phase argileuse. Il s'avère donc qu'elle n'est pas majoritaire, contrairement à ce qui est observé dans le Trias de Lorraine (*cf.* [1], § 3.1). De la chlorite apparaît enfin, sur 10 ou 20 % du total de cette phase. La répartition de chaque argile au sein de la phase argileuse ne semble pas évoluer entre la zone intègre et la zone altérée, la transformation des couches de sub-surface ne semble avoir concerné que l'anhydrite et le gypse.

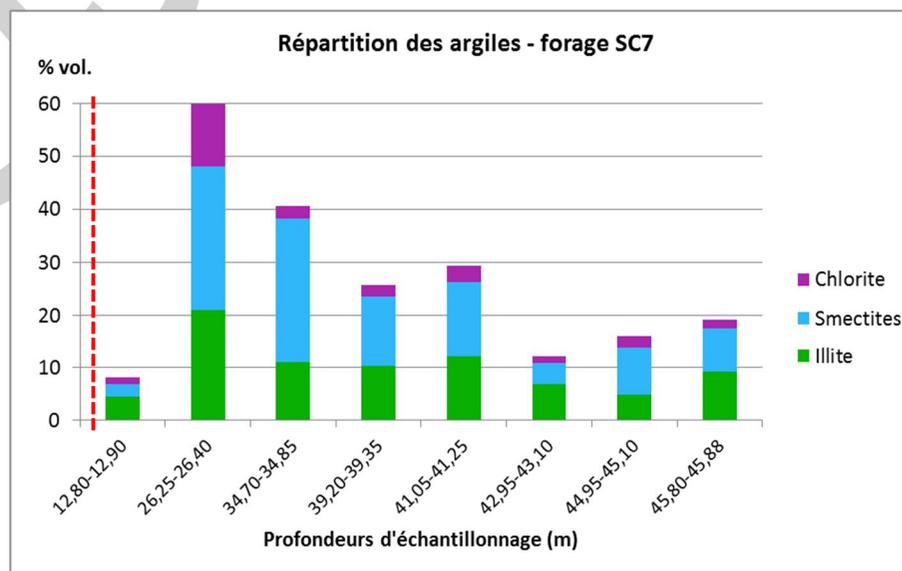
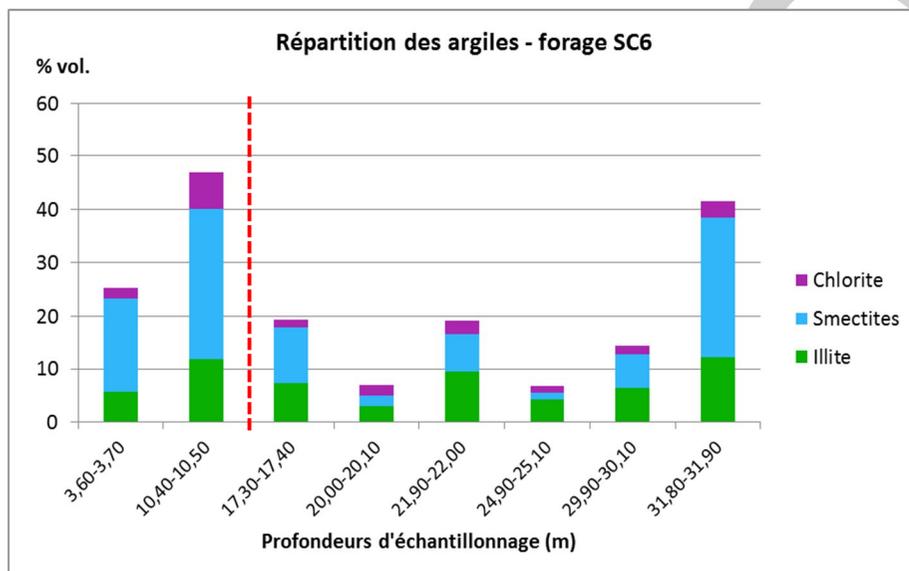
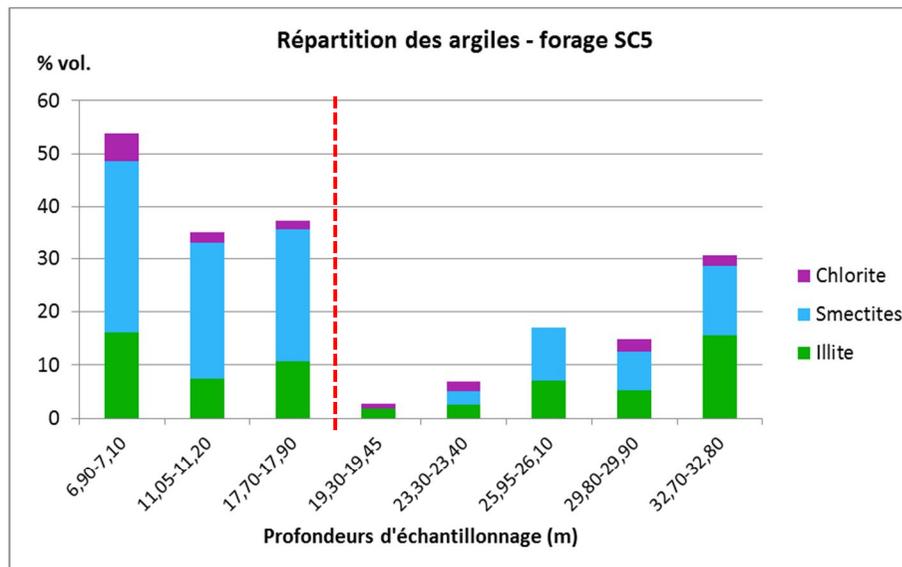
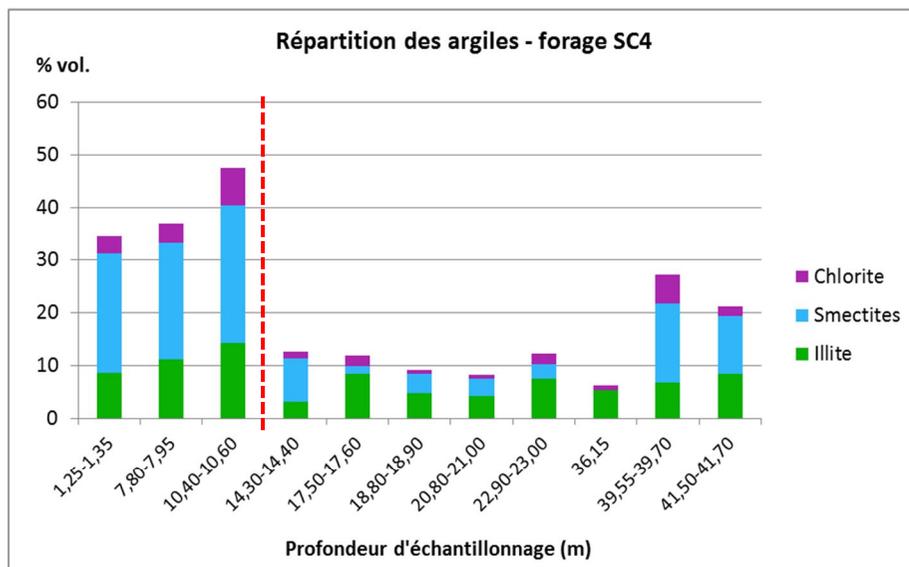


Figure 17 – Histogrammes de répartition des phases argileuses sur les échantillons analysés (trait pointillé rouge : limite basse de la zone altérée)

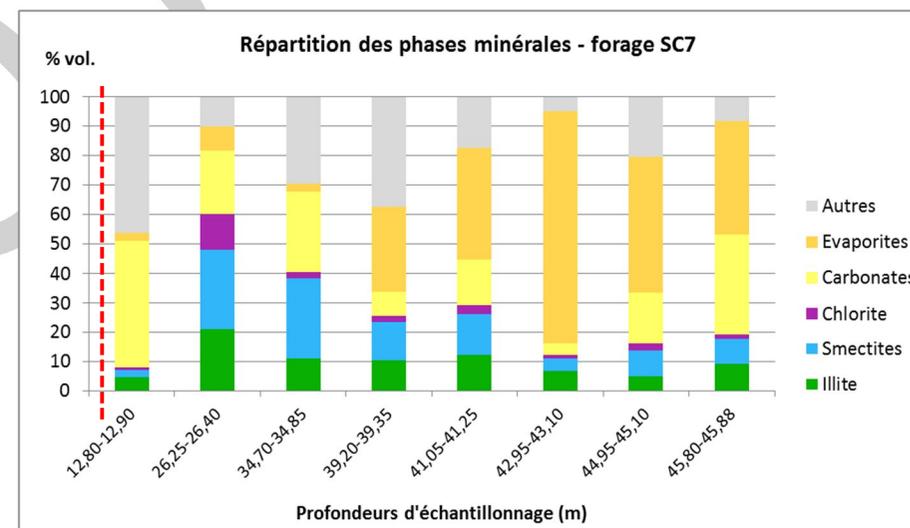
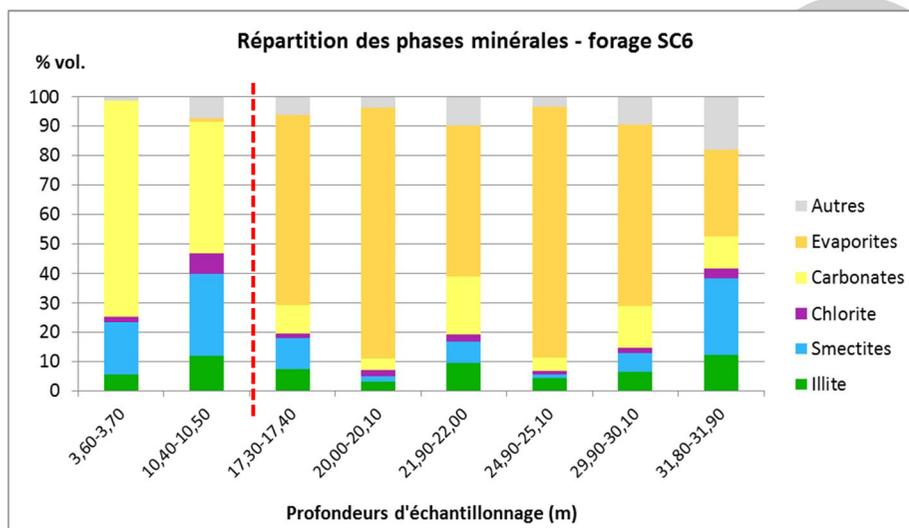
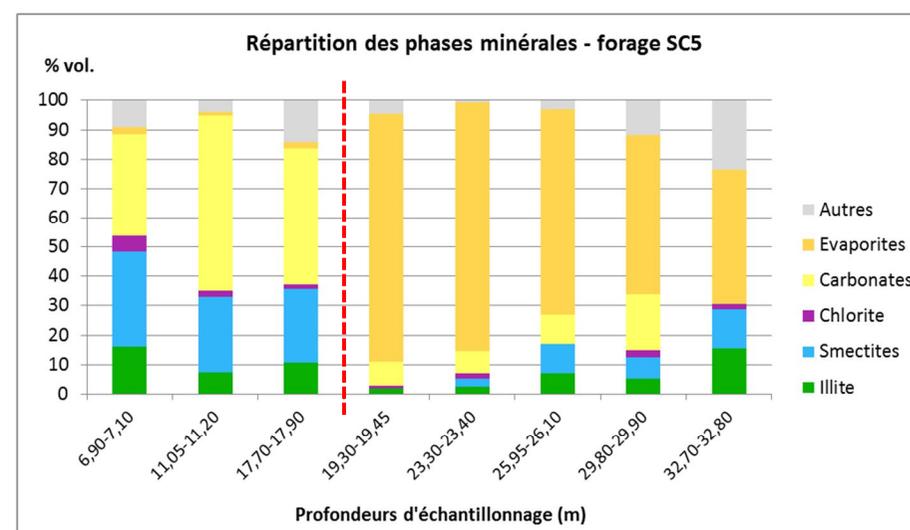
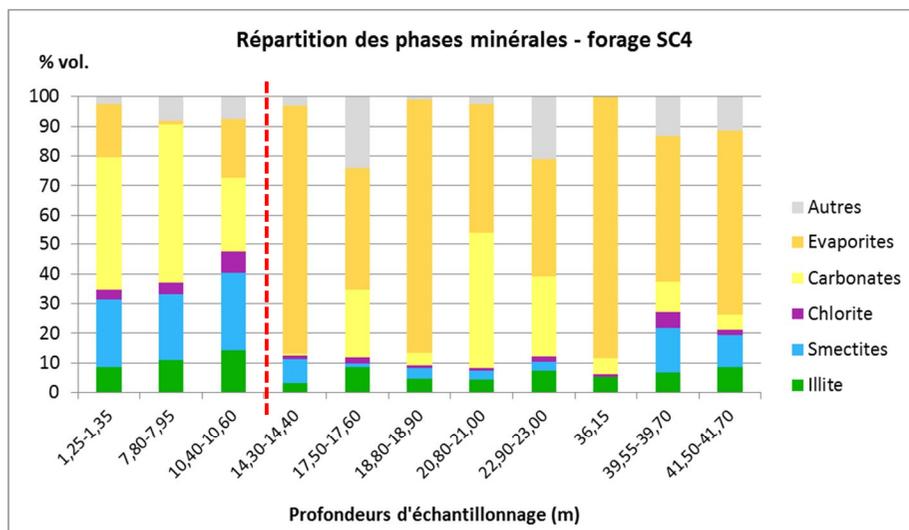


Figure 18 – Histogrammes de répartition des phases minérales sur les échantillons analysés (trait pointillé rouge : limite basse de la zone altérée)

- **Les sulfates**

L'anhydrite, la bassanite, et le gypse sont les trois phases sulfatées détectées en lames minces et par DRX. Cette seconde méthode a permis une différenciation gypse/bassanite qui n'est pas possible par l'examen optique (cf. rapport de Géoressources en Annexe 12). En conséquence, il faut retenir que les commentaires émis par le pétrographe en charge de l'examen des lames minces mentionnent uniquement le gypse, alors qu'il peut s'agir de bassanite.

Les résultats des analyses minéralogiques peuvent être synthétisés, et illustrés, comme suit :

- les différentes formes de sulfate de calcium représentent entre 0 et 88 % volumiques des échantillons analysés. En moyenne sur les quatre forages, les échantillons comprennent 43 % volumiques d'évaporites (zone altérée et zone intègre indifféremment), 52,6 % en zone intègre, et 1,3 % en zone altérée (si l'on exclut l'échantillon à nodules SC4-1 qui contient 18 % de gypse) ;
- le gypse est toujours secondaire, c'est-à-dire issu de l'hydratation de l'anhydrite et de la bassanite, sauf sur un échantillon (SC4-19, prélevé à 42 m de profondeur), où il est primaire et sous forme microcristalline en forme de feuillets fins ;

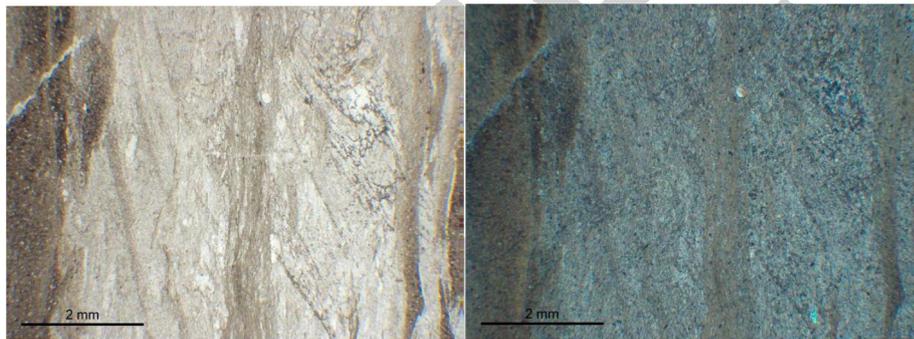


Figure 19 – Vue de lamines comprenant du gypse primaire (7%), de la bassanite (21%) et de l'anhydrite (35%) en lumière polarisée non analysée (à gauche) et en lumière polarisée et analysée (à droite) (échantillon SC4-19)

- les différentes formes de sulfate de calcium se présentent :
 - en nodules, le plus souvent de nature gypseuse ou bassanitique en remplacement de l'anhydrite, comprenant fréquemment des macrocristaux et/ou des microcristaux également. Des cristaux d'anhydrite résiduelle peuvent encore être présents à l'intérieur des nodules.

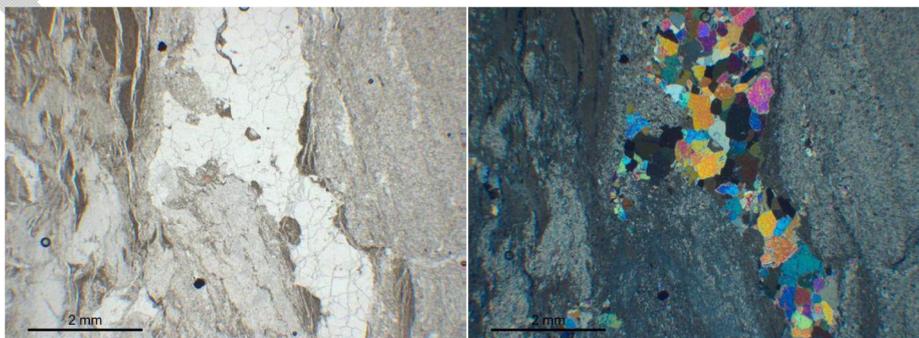


Figure 20 – Vue d'un nodule d'anhydrite en lumière polarisée non analysée (à gauche) et en lumière polarisée et analysée (à droite) (échantillon SC6-12)

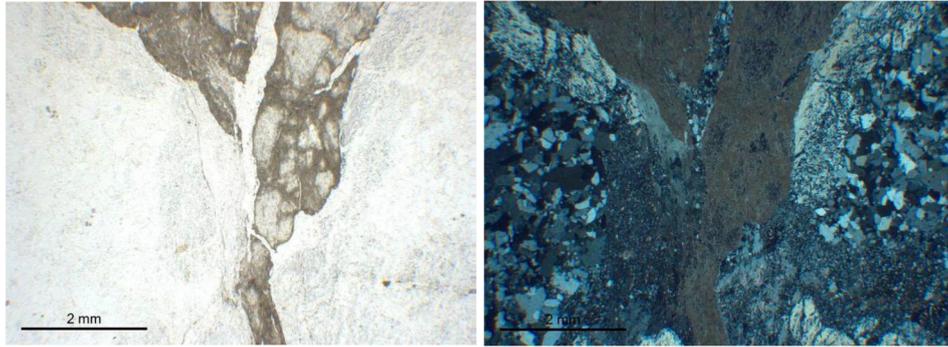


Figure 21 – Vue de portions de nodules de bassanite, et de gypse en lumière polarisée non analysée (à gauche) et en lumière polarisée et analysée (à droite) (échantillon SC4-17)

- en microcristaux disséminés, c'est-à-dire en imprégnation, dans l'encaissant, c'est-à-dire dans le sédiment argileux ou mameux, pouvant être de nature anhydritique ou hydratée (gypse ou bassanite) ;

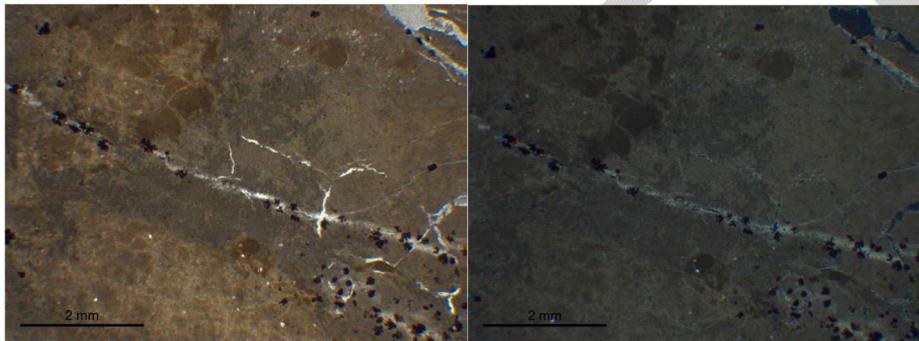


Figure 22 – Vue de microcristaux de gypse disséminés dans la matrice marneuse en lumière polarisée non analysée (à gauche) et en lumière polarisée et analysée (à droite) (échantillon SC4-3)

- en lamines, c'est-à-dire en très fines couches horizontales d'épaisseur comprise entre quelques mm et 2 centimètres, souvent sous forme de macrocristaux, et aussi de microcristaux, fins et allongés, se développant en repoussant les fines couches d'argiles (figures en « crack-and-seal » : obturation, par des cristallisations, des volumes créés par la croissance des cristaux).

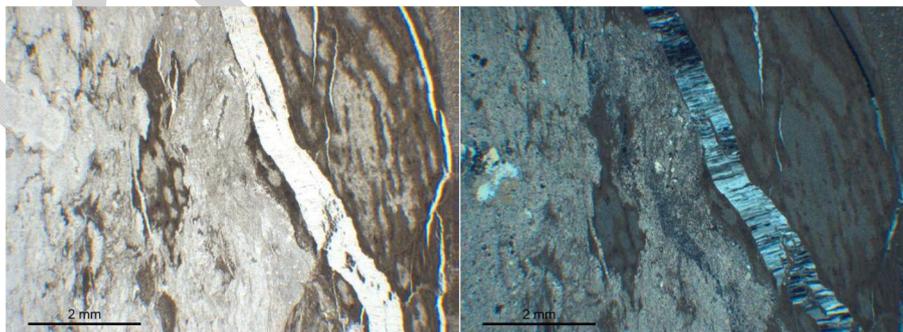


Figure 23 – Vue de macrocristaux de gypse en croissance entre les lamines (figure « crack-and-seal ») en lumière polarisée non analysée (à gauche) et en lumière polarisée et analysée (à droite) (échantillon SC6-10)

- en remplissage de micro-fractures (très fréquent sur le forage SC7). Figures en « crack-and-seal » très fréquentes. Il semble que le gypse ait précipité dans les fractures à partir de solutions riches en sulfate de calcium (on note

l'absence d'anhydrite dans les fractures) et non en remplacement d'anhydrite *in situ*.

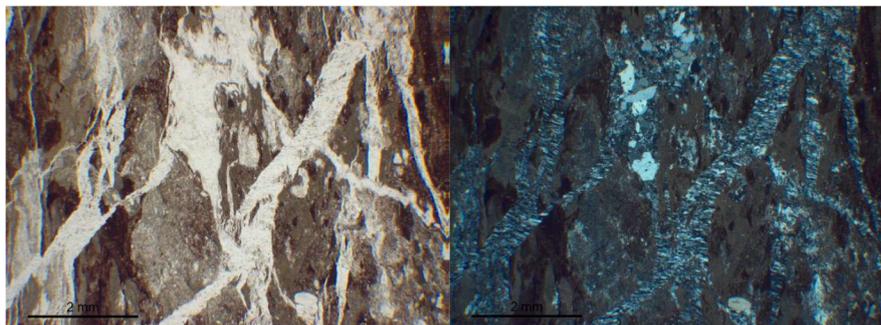


Figure 24 – Vue de macrocristaux de bassanite en croissance entre les lamines et dans des fractures (figures « crack-and-seal ») en lumière polarisée non analysée (à gauche) et en lumière polarisée et analysée (à droite) (échantillon SC7-5)

A l'observation des histogrammes de la Figure 18, on note que la part d'évaporites est faible dans la zone altérée, à hauteur de quelques % (les calculs donnent une valeur de 1,3 % en moyenne), et beaucoup plus importante dans la zone intègre, entre 30 et 85 % généralement (en moyenne 52,6 %). Concernant la part de chaque phase sulfatée, le lecteur est invité à se reporter à l'Annexe 8 qui présente des diagrammes circulaires présentés sur la verticale de chaque forage, et recalés en altitude.

La répartition spatiale des différentes phases sulfatées est examinée dans le détail au paragraphe suivant (§ 4.2.3.3).

Enfin, de l'amarantite, qui est un sulfate de fer hydraté, est présente en très faible quantité, de l'ordre de 1%, sur un échantillon unique SC7-8, prélevé à 45,8 m. Il s'agit d'un minéral relativement rare, *a priori* d'origine évaporitique également.

- **Le quartz**

Le quartz est observé à tous les niveaux analysés, à des proportions comprises entre 0,1 % (échantillon nodulaire SC4-17 à 36,15 m) et 46,0 % (échantillon SC7-1 à 12,8 m). Aucun faciès sableux ou gréseux n'ayant été observé sur les carottes, il s'avère que le quartz constitue la fraction silteuse présente dans les argilites. On notera en outre la présence de petites lamines siliceuses observées très rarement, dans les premiers mètres du forage SC4 et au niveau de l'affleurement sur la propriété Matjeka, qui témoignent de la présence de silice diagenétique, sous forme de silicifications des dépôts argileux préexistants [1].

- **Les feldspaths**

Deux feldspaths apparaissent dans quelques résultats analytiques : l'orthoclase (ou orthose) (de l'ordre de 4-7 % sur de rares échantillons), et l'albite (de l'ordre de 1-2 % sur quelques échantillons). Ils sont d'origine détritique.

- **Les carbonates**

De la dolomite, de la calcite et de la magnésite sont présentes sur l'ensemble des échantillons, dans des proportions très variables. Ils présentent une très fine granulométrie, et sont liés aux phases argileuses pour composer les marnes, qui sont donc plus ou moins calcaires, dolomitiques ou à tendance magnésienne. Ces carbonates donnent aux terrains

des caractères plus massifs, ayant moins tendance au délitement que les terrains plus argileux.

Il a été vu plus haut que la part des carbonates est relativement faible en zone intègre (10-20 % généralement), et plus importante en zone altérée (40-60 % généralement), certainement du fait de la disparition des évaporites.

- **La pyrite**

Un seul échantillon contient de la pyrite à hauteur de 2 % : SC5-2 prélevé à 7,0 m de profondeur. Ce sulfure de fer est présent dans les terrains qui se sont déposés en milieu réducteur.

4.2.3.3 Répartition spatiale de l'anhydrite, de la bassanite et du gypse

Cette répartition est représentée graphiquement dans l'Annexe 8 à l'aide de diagrammes circulaires, qui représentent la part d'évaporites au sein de l'échantillon analysé, et d'une barre empilée associée, qui représente la part de chaque phase sulfatée (anhydrite, bassanite, gypse) au sein du total volumique de sulfates, et ce pour chaque forage carotté.

Cette figure comprend en outre :

- des lettres « A » pour représenter la zone altérée, telle qu'elle a été définie par les observations pétrographiques (cf. § 4.2.2), jusqu'à la profondeur où la part des évaporites augmente brutalement ;
- des indications d'humidité des terrains :
 - o telle qu'elle a été observée par le technicien de GEODERIS en charge du suivi des forages (cette observation est rendue difficile par la présence de l'eau servant à la foration) ;
 - o via les résultats des analyses géotechniques (cf. Annexes 7 et 12)) : teneur en eau « naturelle » et degré de saturation de la roche.
- les niveaux d'eaux mesurés en octobre 2015 ;
- la mention des pertes de fluide de forage.

Observations sur la répartition des sulfates dans la zone altérée au-dessus du niveau hydrostatique

Dans un premier temps, on remarque que la zone altérée se trouve actuellement non saturée, c'est-à-dire au-dessus de la nappe, ceci pour les quatre forages. De ceci, il est possible de déduire qu'un premier aquifère a dû se développer, avant la construction du lotissement, et certainement bien avant l'existence du village de Lochwiller, durant le Quaternaire, dans les premiers mètres sous la surface, par l'infiltration des eaux météoriques. La pente de la colline drainait certainement ce ruissellement hypodermique vers le pied de la colline, puis vers le Dachsgaben (il sera vu plus loin au § 4.3.3.3 que les eaux de ce ruisseau présentent un faciès sulfaté calcique non négligeable). Des sources, selon le témoignage de M. Schorr, apparaissaient, il y a de nombreuses années, en période humide au nord de la maison Salins.

Ce ruissellement de sub-surface a vraisemblablement hydraté l'anhydrite présente (on la retrouve intacte dans le forage SC7 en profondeur si l'on corrèle les bancs) en gypse, a dissous le gypse par apport d'eaux peu minéralisées, donc sous-saturées vis-à-vis du gypse, et tassé les terrains. Les solutions riches en sulfate de calcium ont pu précipiter plus loin ou être drainées vers le Dachsgaben.

Ce milieu a été perturbé par les arrivées d'eau issues du forage géothermique, puis des réseaux d'égout qui se sont disloqués par suite du gonflement. Des eaux d'origine profonde et issues de l'infiltration de la pluie ont commencé à circuler plus en profondeur, dans la zone intègre qui était probablement relativement sèche. Elles ont provoqué le gonflement de l'anhydrite, ce qui a augmenté la perméabilité des terrains par l'apparition de décollements des lamines rocheuses et de fractures. L'aquifère se serait donc déplacé en profondeur, reproduisant le processus décrit ci-dessus d'hydratation de l'anhydrite en gypse, via la phase intermédiaire méta-stable identifiée par les analyses, la bassanite.

Du point minéralogique, dans la zone altérée non saturée, on retrouve du gypse sur SC4 (SC4-3), et plutôt de l'anhydrite sur SC5 (SC5-2 et SC5-4), et sur SC6 (SC6-1 et SC6-4). Les teneurs analysées sont de 1 à 2 %, sauf sur l'échantillon particulier SC4-1, qui comprend les nodules calcaires et qui contient 18 % de gypse. Cette part très faible de minéraux sulfatés constitue visiblement un résidu des transformations minéralogiques précitées.

Observations sur la répartition des sulfates sous la zone altérée et au-dessus du niveau hydrostatique actuel

Cette mince épaisseur de terrain hors d'eau actuellement, où débutent les lamines blanches évaporitiques en forte proportion, a été analysée sur les échantillons SC4-6, SC4-7 et SC5-9. Sur SC4-6, sur les 20 % de minéraux sulfatés, 15 % de gypse et 5 % d'anhydrite apparaissent. On note l'absence de bassanite. Sur SC4-7, la bassanite et l'anhydrite sont en proportion quasi équivalentes (30 et 25 % respectivement) et majoritaires sur le gypse (4,9 %). Sur SC5-9, les 85 % de minéraux sulfatés sont uniquement constitués de gypse. Les transformations minéralogiques en gypse sont complètes sur cet échantillon issu du forage SC5, mais incomplètes sur les deux échantillons du forage SC4.

Observations sur la répartition des sulfates sous la zone altérée et au-dessous du niveau hydrostatique actuel

✓ Forage SC4

Sous le niveau de la nappe actuelle, situé vers +209 m NGF, les terrains sont apparus humides sur 5 m, puis légèrement humides sur 6 m, puis en apparence secs sur les 21 m les plus profonds. Les teneurs en eau mesurées corroborent majoritairement ces observations (9-10 % à 6 et 10 m sous le niveau de la nappe, puis 8-10 % plus en profondeur). Les analyses minéralogiques des 6 premiers échantillons fournissent des indications de fortes teneurs en minéraux sulfatés, entre 32 et 85 %. Certaines phases sulfatées sont en majeure partie constituées de gypse (SC4-6, SC4-20, SC4-13 et SC4-16), d'autres comportent majoritairement de la bassanite (SC4-12, échantillon à nodules, SC4-15, échantillon en lamines, et SC4-14, plutôt nodulaire).

Vers 22 m de profondeur, les terrains sont apparus plus secs. Les évaporites présentes, analysées sur trois échantillons, sont, du point de vue des transformations minéralogiques, beaucoup moins avancés que les précédents plus superficiels : la bassanite est majoritaire (28 à 65 %), l'anhydrite n'est vraiment présente que sur l'échantillon le plus profond (41 m) à hauteur de 35 %, et le gypse est également peu présent (7 à 18 %). La teneur en eau remonte vers la profondeur, à 9,8 %. Il est difficile de savoir si le gypse et la bassanite présents sont récents et si la zone est en gonflement. De l'eau pourrait provenir du forage géothermique à ces niveaux.

En résumé, à proximité immédiate du forage géothermique, le gypse est plutôt majoritaire (24-40 % sauf sur SC4-15, SC4-12 et SC4-7)), sous le niveau de la nappe actuelle, entre 14 et 23 m de profondeur. De la bassanite est également présente, sur certains échantillons, à

des % non négligeables (40-59 %). L'anhydrite est souvent absente (1 à 5 %) sauf sur l'échantillon SC4-7 (25 %). Le gonflement, au vu des informations minéralogiques et relatives aux teneurs en eau, semble se produire sur la tranche 198-209 m NGF, soit entre 11 et 22 m de profondeur.

Au-delà de 22-23 m de profondeur, la bassanite et l'anhydrite sont majoritaires, les terrains paraissent plus secs mais la teneur en eau vers 40 m est tout de même de 9,8 %, ce qui n'exclut pas complètement que des arrivées d'eaux du forage géothermique ait initié un gonflement également.

✓ Forage SC5

Il est rappelé que ce forage se situe à l'épicentre du gonflement. Sous la nappe, les terrains sont, comme sur le forage SC4, apparus humides, sur 4 m, puis légèrement humides, sur les 8 derniers mètres. Les teneurs en eau fournissent des valeurs de 7,1% à 3 m sous la nappe, et 4,2 % à 9 m sous la nappe. Ce forage atteint des niveaux beaucoup moins profonds que le forage SC4. Les minéraux sulfatés représentent 46 à 85 % du volume rocheux. Le premier échantillon sous la surface (SC4-11), ne comprend que du gypse (83 %). Il s'agit du banc gypseux qui a servi aux corrélations (cf. § 4.2.1.4). Le second (SC4-18), comprend 18 % d'anhydrite, 33 % de bassanite et 19 % de gypse. Le troisième n'est composé que d'anhydrite (52 %) et de traces de bassanite (2 %), et le dernier plutôt de gypse (33 %), et d'un peu d'anhydrite (13 %).

A la lecture de ces valeurs, on constate que les transformations minéralogiques paraissent très avancées juste au-dessus et au-dessous du niveau de l'eau (2 m au-dessus, 3 m au-dessous), avec quasiment uniquement du gypse en présence, mais que plus en profondeur, à partir de 5 m sous la nappe, l'anhydrite reste encore relativement présente (18 %, 52 % et 13% sur les trois échantillons), ainsi que la bassanite sur l'un des échantillons seulement (33 % sur SC5-18). La teneur en eau étant faible (4,2 %) à 9 m sous la nappe, et les transformations minéralogiques peu avancées, il est probable que l'aquifère ne concerne pas cette tranche profonde, et que le gonflement découle de la présence d'eau plus haut, soit compris dans la tranche 203-211 m NGF.

✓ Forage SC6

Ce forage est situé en aval pendage par rapport au forage géothermique et par rapport à l'épicentre du gonflement. Il semble que le gonflement soit apparu plus tard que sur l'impasse Koelberg.

Le niveau d'eau dans ce forage correspond à ceux observés dans les forages SC5 et SC6 (environ 209 m NGF).

Sous la nappe, les trois premiers échantillons mettent en évidence la présence très largement majoritaire de la bassanite. Le premier échantillon, prélevé à 0,5 m sous la nappe contient 64 % de bassanite (0 % d'anhydrite et de gypse). Le second, prélevé à 3 m sous la nappe, contient 85 % de minéraux sulfatés, dont 78 % de bassanite et 7 % de gypse. Le troisième, à 5 m sous la nappe, ne contient que de la bassanite à hauteur de 51 %. Les terrains dans cette tranche sont apparus légèrement humides. La teneur en eau est de l'ordre de 13-14 % (deux mesures à -0,5 m et - 6 m sous le niveau hydrostatique). Plus bas, les terrains sont apparus secs à l'observation, les teneurs en eau le confirment puisqu'à -8 m sous la nappe, elle a décliné à 9,1 %, et à -13 m, elle n'est plus que de 4,2 %. Dans ces niveaux plus secs, la transformation des minéraux sulfatés est peu engagée. Tout d'abord concernant le banc rose qui a servi aux corrélations, et qui contient uniquement du gypse à 83 % dans le forage SC5, contient dans le forage SC6, 86 % de minéraux sulfatés, dont cette fois-ci 75 % d'anhydrite et 11 % de bassanite. Les deux échantillons prélevés plus bas

(SC6-12 et SC6-14) vers le fond du forage contiennent un mélange d'anhydrite et de bassanite, mais pas de gypse.

Globalement sur ce forage, la tranche humide qui comprend l'aquifère et où des transformations minéralogiques apparaissent au vu de la présence largement majoritaire de bassanite, est située entre 203 et 209 m NGF. C'est dans cette tranche que le gonflement s'est initié. L'absence de gypse indique que les transformations sont moins avancées qu'au droit des forages SC4 et SC5.

✓ Forage SC7

Le forage SC7 est situé à l'extérieur de la zone actuellement en surrection. Dans le piézomètre SC7, le niveau d'eau est beaucoup plus superficiel que sur les trois autres forages. Il se situe autour de 223 m NGF. Sachant que la crépine est positionnée entre 197,5 et 209,5 m NGF, le niveau d'eau mesuré correspond à une charge hydraulique présente dans les bancs sous-jacents. L'aquifère est devenu captif au droit du forage SC7 du fait de l'imperméabilité des niveaux sus-jacents. Lors des prélèvements d'eau réalisés en octobre 2015 (cf. § 4.3), ce piézomètre réalimentait très bien lors de la phase de purge, ce qui, dans ce milieu très argileux, laisse penser que des circulations d'eau se produisent à la faveur de niveaux fissurés.

Cinq mesures de teneur en eau sont disponibles : les trois premières, comprises entre 7 m et 15 m sous la surface de la nappe, indiquent des valeurs autour de 14-15 %, laissant penser que de l'eau circule dans les terrains. A ces mêmes profondeurs, deux échantillons rocheux ont été analysés. Ils contiennent peu d'évaporites : 8 et 3 %, dont sur le premier 4% d'anhydrite et 4 % de gypse, et sur le second 3 % d'anhydrite uniquement. Dans les terrains plus secs en profondeur, les teneurs en eau se situent autour de 5 %. Les analyses minéralogiques sont plus nombreuses, les bancs échantillonnés correspondant géologiquement aux bancs en cours de gonflement dans les forages SC4, SC5 et SC6. Dans ce forage SC7, les minéraux sulfatés représentent entre 29 et 79 % du volume rocheux. Bien que la teneur en eau soit faible, et ne semble pas indiquer de circulations d'eau, la bassanite est majoritaire dans la plupart des échantillons. On y rencontre également un peu d'anhydrite (0 à 29 %), et très peu de gypse (souvent absent, et jusqu'à 10 % maximum).

Le banc rose-orangé d'aspect bréchique qui a servi aux corrélations contient, au droit du forage SC7, majoritairement de l'anhydrite (46,9 %), ainsi que de la bassanite (15 %). Le gypse y est absent.

En résumé, sur ce forage, les lamines de minéraux sulfatés sont constituées essentiellement de bassanite, et en moindre proportion d'anhydrite. Il est difficile de savoir si ce secteur est en cours d'évolution. Il semblerait que ce ne soit pas le cas, au vu des teneurs en eau qui sont faibles dans ces niveaux rocheux, toutefois, la bonne réalimentation du piézomètre lors du pompage indique tout de même des circulations d'eau certainement à la faveur de fissures, qui sont nombreuses en profondeur. La diagraphie de température réalisée laisse également soupçonner un léger début de gonflement (cf. § 4.3.2).

4.3 Données relatives aux eaux souterraines

4.3.1 Données hydrogéologiques

4.3.1.1 Piézométrie

Des mesures de piézométrie ont été effectuées à différentes reprises depuis la foration des ouvrages SC4 à SC7. Les puits privés « puits communal », « puits Matjeka » et « puits Schorr » ont également fait l'objet de mesures.

Il s'est avéré que le niveau de la nappe est inférieur à la limite inférieure de la crépine du piézomètre SC6. Il capte la zone non saturée. Les mesures sont donc effectuées dans le SC6-2.

Pour mémoire, les relevés effectués par le géomètre pour le compte du BRGM-DPSM ont fourni les altitudes suivantes pour les ouvrages :

	X	Y	Z	Remarque
Inclino 1 Kandel	1024945,837	6852935,883	220,470	Dessus couvercle
Inclino 2 Belhadj	1024978,057	6852965,760	225,796	Dessus couvercle
Puits Communal	1024934,935	6853050,628	216,384	Marque de peinture sur puits communal
Puits Matjeka	1024916,249	6852986,780	213,127	Marque de peinture sur puits Matjeka
Puits Schorr	1024904,115	6852925,083	211,329	Marque de peinture sur puits Schorr
PZ1 Kandel	1024945,297	6852932,433	220,539	Dessus couvercle

Tableau 1 – Coordonnées des ouvrages relevés par le géomètre Lambert de Brumath, pour le compte du BRGM-DPSM (Lambert 93)

Les résultats des mesures sont les suivants :

	SC4		SC5		SC6-2		SC7	
Cote haut du tube ou repère (m NGF)	220,98		230,05		225,33		243,85	
Dates des mesures	Prof. eau /tube (m)	Cote (m NGF)	Prof. eau /tube (m)	Cote (m NGF)	Prof. eau /tube (m)	Cote (m NGF)	Prof. eau /tube (m)	Cote (m NGF)
17/08/2015	11,9	209,08	21,1	208,95	16	209,33	20,64	223,21
25/08/2015	11,94	209,04	21,05	209	16,17	209,16	20,75	223,1
22/09/2015	11,99	208,99	21,21	208,84	16,29	209,04	20,83	223,02
21/10/2015	12,08	208,9	21,32	208,73	16,41	208,92	21,04	222,81

Tableau 2 – Mesures de piézométrie sur les forages SC4 à SC7 (la crépine du forage SC6 n'atteint pas la nappe)

	Puits Schorr		Puits Matjeka		Puits communal	
Cote haut du tube ou repère (m NGF)	211,33		213,13		216,38	
Dates des mesures	Prof. eau /tube (m)	Cote (m NGF)	Prof. eau /tube (m)	Cote (m NGF)	Prof. eau /tube (m)	Cote (m NGF)
22/09/2015	2,79	208,54			6,07	210,31
21/10/2015						
22/10/2015	2,90	208,43	4,73	208,4	6,21	210,17

Tableau 3 – Mesures de piézométrie sur les puits privés

Aucune mesure n'a été prise en compte depuis fin octobre 2015 car les travaux de rebouchage du forage géothermique, en cours depuis cette date, perturbent la piézométrie sur SC4, SC5 et SC6-2.

L'évolution dans le temps de ces niveaux est présentée sur les graphiques suivants (Figure 25 et Figure 26, sans SC7). Ils ont une tendance générale à la baisse, sans doute liée à la faible pluviométrie enregistrée en été et en automne 2015. Le battement semble faible, mais les mesures peu nombreuses et la période d'investigations courte ne permet pas de vraiment l'évaluer.

Les mesures faites par Plume [23] sur le Pz1, très proche du SC4, au printemps 2013 (février à mai) fournissaient une altitude de 209,42 à 209,68 m NGF, ce qui est légèrement plus élevé que les mesures de 2015 faites en fin d'été.

De plus, il apparait clairement que le niveau d'eau dans le forage SC7 est beaucoup plus élevé en altitude que dans les autres ouvrages. Il s'agit d'un niveau aquifère à caractère captif. En effet, l'ouvrage a été crépiné entre 197,5 et 209,5 m NGF, sachant que le niveau d'eau dans les autres ouvrages s'établissait autour de 209,0 m NGF. Il est apparu que le niveau de l'eau s'est stabilisé dans ce forage SC7 autour de 223 m NGF.

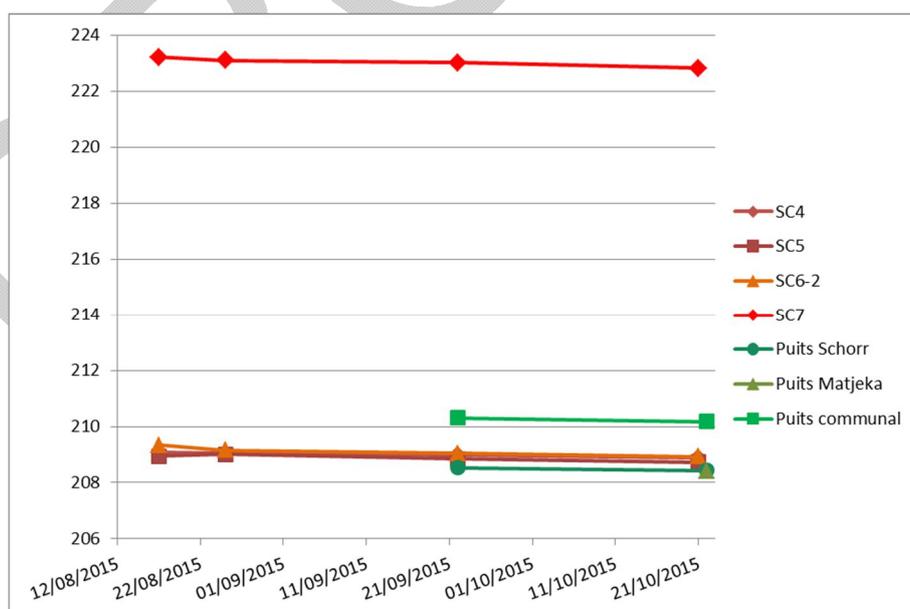


Figure 25 – Evolution des niveaux piézométriques mesurés dans le temps (m NGF)

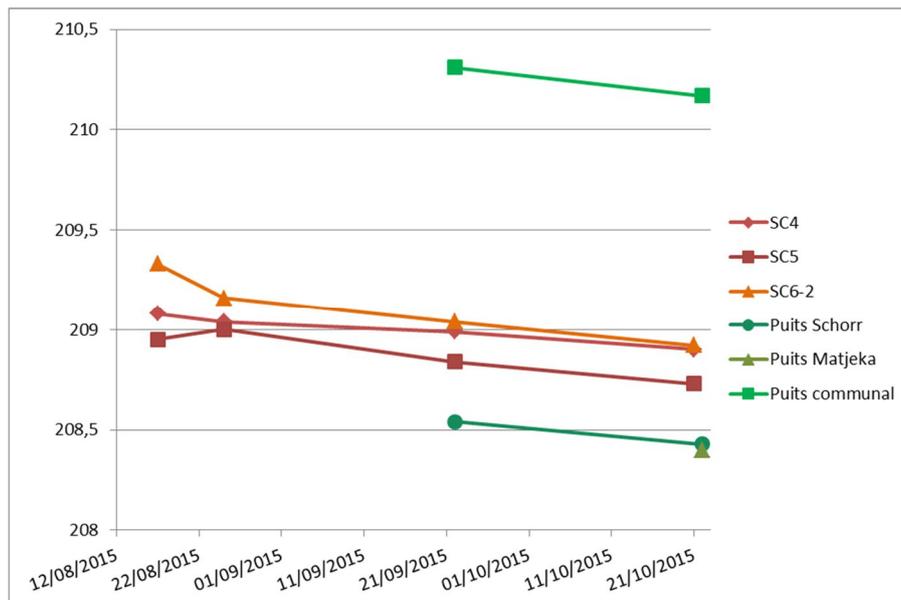


Figure 26 – Evolution des niveaux piézométriques mesurés dans le temps, sans SC7 (m NGF)

Les forages captent un aquifère qui s'est développé dans les marnes et argilites du Keuper, probablement suite à leur déstructuration consécutive au gonflement de l'anhydrite. Il a été vu plus haut que l'aquifère, qui était certainement peu productif, auparavant localisé sous la surface dans la zone altérée, était en quelque sorte « descendu ».

Les trois puits privés captent également le Keuper, toutefois il semble s'agir d'une zone altérée qui serait présente en pied de versant. Nous déduisons la présence de cette zone altérée des observations géologiques réalisées par FONDASOL, dans le cadre de l'expertise judiciaire. Dans le carottage réalisé dans la cour de la ferme Schorr en 2011 [24], les terrains rencontrés sont (sondage R1) : du remblai jusqu'à 0,4 m, du limon argileux gris-vert et beige légèrement sableux avec cailloutis jusqu'à 0,7 m (limons quaternaires probablement), puis de la marne gris-mauve à mauve jusqu'à 3 m de profondeur, caractéristique du Keuper. Aucun niveau évaporitique n'est mentionné, alors que la corrélation des bancs indique que cette tranche de terrains correspond aux terrains compris grosso modo entre 203 et 206 m dans le forage SC4. Ces derniers comprennent 20 à 30 % d'évaporites. Le niveau de l'eau dans le puits Schorr, qui se situe autour de 2,8 m indique bien que l'aquifère capté par le puits est constitué par les terrains du Keuper, qui se sont avérés altérés sur au moins 3 m.

De plus, dans le carottage SC3, réalisé également par FONDASOL, en 2013 [25], dans la cour de la maison Matjeka, les terrains du Keuper apparaissent à partir de 0,8 m de profondeur. Des marnes et argiles grises, beiges, vertes ou bariolées sont décrites jusqu'au fond du forage situé à 10 m. Hormis un petit niveau à anhydrite entre 1,43 m et 1,60 m, celle-ci n'apparaît plus qu'à 7,50 m. Il serait donc possible de considérer une zone altérée de 7-8 m environ en pied de versant. Le puits Matjeka capte également des eaux du Keuper puisque leur niveau se situe autour de 4,8 m.

Une esquisse de carte piézométrique est proposée ci-dessous, à la date du 21/22 octobre 2015. Il a été choisi lors de nos réflexions de connecter les niveaux d'eau des puits privés situés en pied de versant avec ceux mesurés dans les forages au droit de la colline. Il est difficile de savoir s'il s'agit d'un seul et même aquifère avec des masses d'eau connectées, ou si les deux secteurs sont déconnectés, et jusqu'où. Toutefois, il sera vu plus loin que les eaux souterraines du coteau alimentent le puits Schorr, lui conférant un faciès hydrogéochimique différent de celui des autres puits, il s'agirait donc d'un seul et même aquifère.

Concernant les puits privés, le puits communal montre un niveau d'eau de presque 2 m plus élevé que celui des deux autres, qui par ailleurs, sont quasiment à la même altitude, à 3 cm près. Un écoulement vers le sud-ouest, puis vers l'ouest au niveau de la maison Schorr est proposé.

Concernant le secteur de la colline, seuls trois points de mesure sont disponibles, SC4, SC5 et SC6-2. Nous proposons une interprétation en termes de « dôme piézométrique » atteignant environ 208,9 m NGF. Ce dôme mettrait en évidence la zone de gonflement, là où les eaux issues de la pluviométrie sont ainsi susceptibles de s'infiltrer plus facilement. Il a été vu plus avant (§ 4.2.3.3) que le gonflement semble se localiser dans la tranche 203-209 m NGF au droit des forages SC4, SC5 et SC6/6-2. C'est probablement dans cette tranche, que l'aquifère actuel situé au droit du lotissement s'est développé. Vers le nord, l'est, et vers le sud, tant que l'on reste sur la colline, l'aquifère disparaît probablement avec la limite du front de gonflement. On le retrouve en pied de versant, à l'ouest, où se trouvent les puits privés du vieux village.

Ainsi, l'esquisse piézométrique propose un dôme piézométrique centré sur le lotissement, peut-être alimenté au nord-ouest par les eaux du secteur du puits communal dont la charge hydraulique s'élève à une altitude plus élevée (environ 210 m NGF au puits communal), et alimentant au sud-est le secteur du puits Schorr.

L'examen, dans le paragraphe suivant, des données hydrogéochimiques, permettra d'apporter des éléments quant à ces hypothèses.

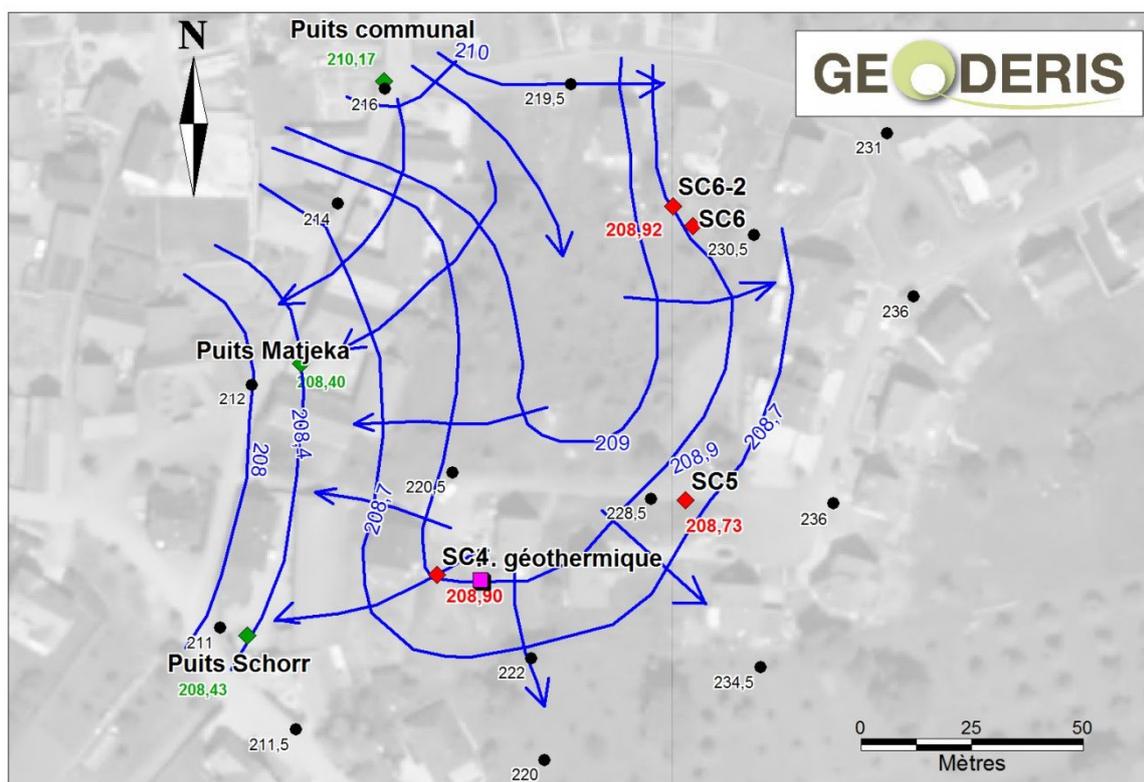


Figure 27 – Esquisse de carte piézométrique du Keuper (en rouge : piézomètres, en vert : puits domestiques – Points noirs : cotes topographiques (valeurs nov. 2015 arrondies))

4.3.1.2 Observations concernant la perméabilité des terrains

Des prélèvements d'eaux souterraines ont été effectués les 21 et 22 octobre 2015, par nos soins, à l'aide d'une pompe immergée (Pompe MP1 de la marque Grundfos), permettant le

renouvellement de la colonne d'eau à au moins trois reprises (norme XP-31615). A cette occasion, il a été constaté que certains piézomètres réalimentaient bien : c'est le cas de SC5, et SC7, et que d'autres se vidaient très rapidement, c'est le cas des forages SC4 et SC6-2. Ces observations sont cohérentes avec les résultats obtenus par l'entreprise de forages lors du développement des ouvrages (cf. § 4.1.4). Ce phénomène tient probablement à la présence, ou à l'absence de fissures ouvertes permettant des circulations d'eaux, recoupées par le forage.

Les pertes totales de boue signalées au § 4.1.2 sur SC4 à 211 m NGF (9 m de profondeur) se situent au-dessus de la nappe. La fissure ou le niveau perméable rencontré n'ont pas d'impact sur la perméabilité des terrains au niveau de la crépine.

Sur SC7, la perte de boue a été signalée à 39,10 m (204,4 m NGF). Il s'agit d'un niveau ou d'une fissure situé dans le niveau crépiné, il ou elle peut donc être responsable des circulations d'eaux importantes observées dans le piézomètre SC7.

4.3.2 Données de température et de conductivité électrique des eaux

Des diagraphies de température et de conductivité électrique des eaux souterraines ont été effectuées dans les forages SC4, SC5, SC6-2 et SC7 le 22 septembre 2015, soit un mois après les opérations d'air-lift et de pompage destinées à nettoyer les ouvrages des particules argileuses et des additifs utilisés en forage. Les eaux souterraines ont ainsi eu le temps de trouver un équilibre, du point de vue écoulement, stratification éventuelle des eaux, et température.

Le forage SC6 n'a pas fait l'objet de mesures, car le niveau de la nappe est inférieur à la limite inférieure de la crépine. Il capte la zone non saturée.

Il est rappelé que la transformation de l'anhydrite en gypse est un phénomène exothermique. Il dégage de la chaleur, que nous espérons pouvoir mettre en évidence par les mesures. Une sonde Diver a été descendue lentement dans chaque ouvrage investigué, pour ne pas perturber l'équilibre instauré. La sonde a été calibrée pour produire une mesure à un pas de temps d'une minute. Entre chaque mesure, la sonde a été descendue manuellement de 25 cm, sauf pour le forage SC7, où l'intervalle de mesure est de 50 cm. Sur le forage SC7, par ailleurs, les mesures n'ont été effectuées que sur la partie crépinée, soit entre 197,5 et 209,5 m NGF. La partie en tube plein entre 209,5 et 223 m NGF (niveau d'eau stabilisé) n'a pas été investiguée, s'agissant très certainement d'eaux stagnantes à l'intérieur du tube.

Les résultats obtenus sont fournis dans les graphiques suivants. Les points de mesure ont été recalés en altitude, afin d'être interprétés. Les axes des graphiques présentent les mêmes intervalles de température et de conductivité électrique, afin de pouvoir être comparés les uns aux autres.

On note tout d'abord que les eaux du forage SC7, situé en théorie en dehors de la zone impactée par les transformations minéralogiques, présentent des températures relativement stables avec la profondeur, comprises entre 11,52 et 11,78 °C. A cela on peut ajouter que les valeurs les plus élevées se situent autour de 201-205 m NGF. Les diagrammes circulaires de l'Annexe 8 montrent que sur cet intervalle d'altitudes, la bassanite est très largement majoritaire sur l'anhydrite, et que le gypse est quasiment absent (Figure 29). Cela pourrait signifier un léger phénomène de transformations minéralogiques de l'anhydrite en bassanite, en cours. L'anhydrite est beaucoup plus présente au-dessus et au-dessous de ces altitudes.

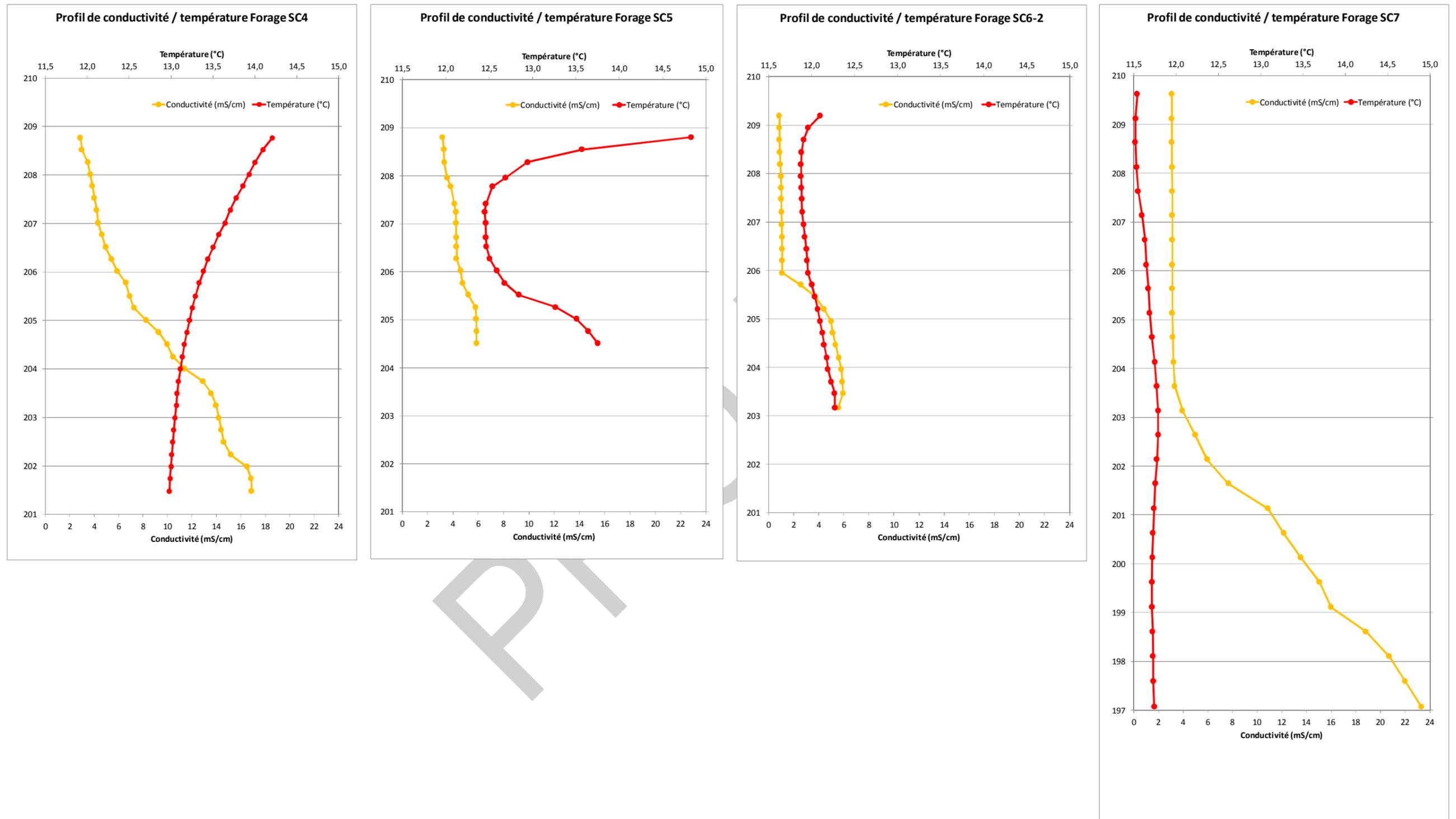


Figure 28 – Profils de conductivité électrique et de température sur les eaux des forages SC4 à SC 7

La conductivité électrique des eaux est stable de 209,5 (haut de la crépine) à 203,5 m NGF, puis croit régulièrement, jusqu'à atteindre des valeurs caractéristiques d'eaux extrêmement minéralisées (> 23 mS/cm). Un phénomène de stratification des eaux par densités, donc par salinités, croissantes, a dû se produire dans la partie inférieure de la crépine, si la conductivité hydraulique est très faible, et que les eaux circulent très lentement et/ou que les eaux souterraines sont absentes. Il serait donc possible d'envisager des vitesses de circulation plus importantes au-dessus de 203 m NGF, ce qui correspond *grosso modo* à la portion d'aquifère où les eaux sont légèrement plus chaudes. Cela appuierait l'hypothèse de phénomènes de transformations d'anhydrite en cours. Les températures relevées dans les forages SC4 et SC5, bien supérieures et atteignant presque 15°C (voir plus bas), conduisent à qualifier ce phénomène de très modéré dans ce secteur du forage SC7. La conductivité électrique du prélèvement d'eau sur SC7 (3,12 mS/cm) conduit à envisager la venue d'eau au-dessus de 204 m NGF. Cela va bien dans le sens de circulations d'eaux plus aisées dans la partie supérieure de la crépine.

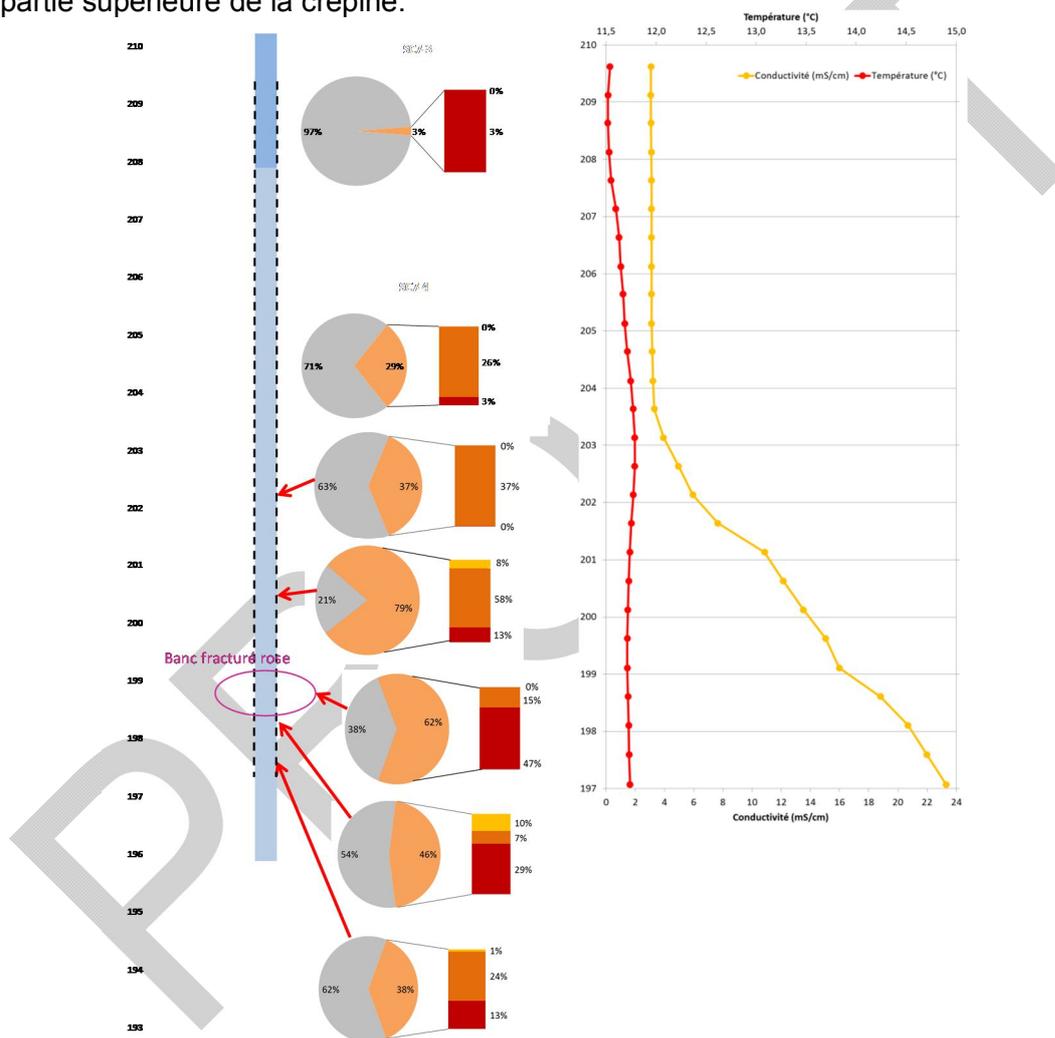


Figure 29 – Comparaison des compositions minéralogiques des carottes analysées (voir Annexe 8 pour la légende) et des températures et conductivités électriques mesurées sur les eaux souterraines – Piézomètre SC7

Les mesures réalisées à l'intérieur de la crépine du piézomètre SC6-2 montrent une température légèrement plus élevée qu'à l'intérieur du SC7. En effet, on mesure 12,1°C en surface de l'eau à 209,2 m NGF, la température diminue ensuite à 11,87 °C autour de 208 m NGF, puis remonte continuellement jusqu'à la mesure la plus profonde, située à 203,2 m NGF, jusqu'à atteindre 12,27°C. Les eaux sont également beaucoup plus conductrices en profondeur. Après avoir stagné autour de 1 mS/cm entre 209 et 206 m, elles atteignent en

fond de forage 6 mS/cm, puis amorcent une redescente à 5,57 mS/cm vers 203 m NGF. L'interprétation proposée pour ces mesures est la suivante : les transformations d'anhydrite en gypse seraient déjà présentes à 209 m NGF, la température de l'eau étant d'emblée plus élevée que dans SC7. Plus en profondeur, la température et la conductivité électriques croissantes indiqueraient un degré de transformations plus important, et ceci dans la tranche 203-206 m NGF. Ces hypothèses sont cohérentes avec celle d'un gonflement situé sur la tranche 203-209 m pour SC6, basé sur la présence quasi unique de bassanite sur ce niveau, et sur la présence très majoritaire d'anhydrite sous la cote 200 m NGF (Figure 30).

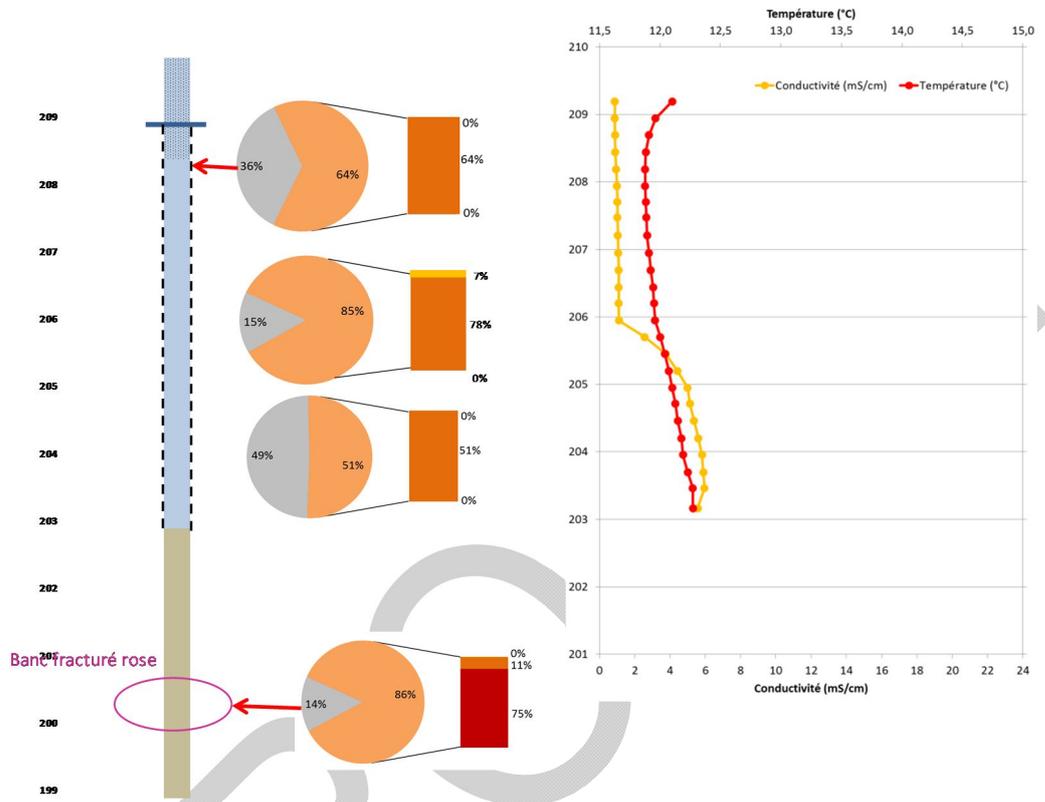


Figure 30 – Comparaison des compositions minéralogiques des carottes analysées (voir Annexe 8 pour la légende) et des températures et conductivités électriques mesurées sur les eaux souterraines – Piézomètre SC6-2

Les mesures effectuées sur les eaux du piézomètre SC5 fournissent des résultats très particuliers du point de vue de la température. Celle-ci est beaucoup plus élevée que sur SC6-2 et SC7, puisque comprise entre 12,45°C et 14,83°C. Les valeurs les plus fortes se rencontrent entre 208 et 209 m NGF, on note une décroissance de 14,83°C à quasiment 209 m, jusqu'à 12,5°C à 207,8 m. Les valeurs les plus faibles se rencontrent ensuite jusqu'à 206 m, et c'est sur cet intervalle de profondeur que la conductivité commence à augmenter. En dessous de 206 m, la température remonte jusqu'à 13,75°C à 204,5 m. La conductivité continue à augmenter également, jusqu'à 6 mS/cm environ. Comme supposé à l'examen des analyses minéralogiques, cette tranche de terrain apparaît comme concernée par le gonflement, en particulier entre 204,5 et 205,5 m NGF, et 208 et 209 m NGF.

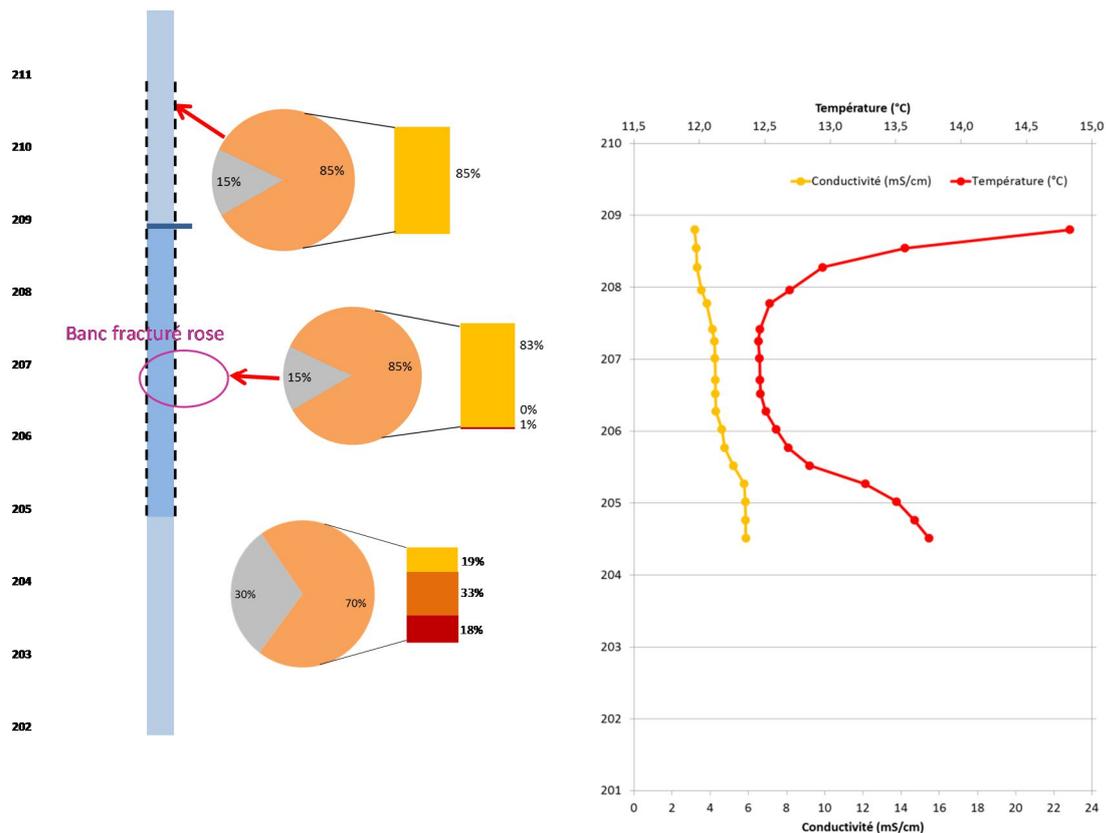


Figure 31 – Comparaison des compositions minéralogiques des carottes analysées (voir Annexe 8 pour la légende) et des températures et conductivités électriques mesurées sur les eaux souterraines – Piézomètre SC5

Sur les eaux du piézomètre SC4, enfin, la température est très élevée, au regard des températures relevées sur SC7 et SC6-2, mais dans la même gamme que les températures relevées sur SC5, à l'épicentre du gonflement. Elles débutent à 14,2°C à 208,8 m NGF, puis diminuent constamment vers la profondeur, jusqu'à 13°C à 201,5 m NGF. Conjointement à cette baisse de température, la conductivité électrique des eaux augmente également, par sauts, passant de 2,9 à 16,9 mS/cm, traduisant la présence d'eaux très minéralisées en fond de forage. Les températures des eaux sur toute la hauteur crépinée semblent mettre en évidence la présence d'un phénomène d'hydratation de l'anhydrite sur toute la tranche de terrains. En effet, les températures sont toujours plus élevées que sur le forage témoin théorique d'une zone non impactée en SC7, même si l'on peut soupçonner sur cet ouvrage un début d'amorce du phénomène. Les analyses minéralogiques et les teneurs en eau conduisaient à supposer un gonflement entre 202 et 209 m, les interprétations sont donc cohérentes entre elles.

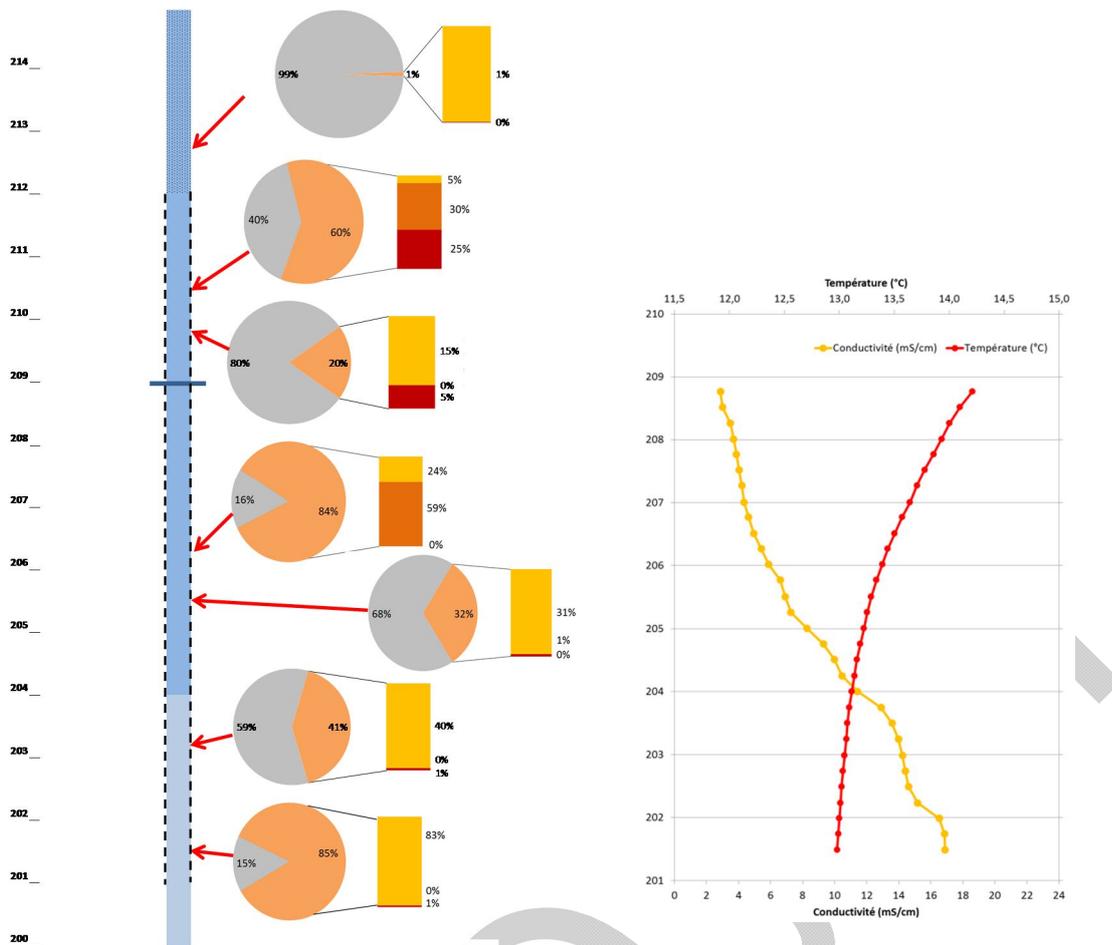


Figure 32 – Comparaison des compositions minéralogiques des carottes analysées (voir Annexe 8 pour la légende) et des températures et conductivités électriques mesurées sur les eaux souterraines – Piézomètre SC4

Les diagraphies des puits Schorr et communal ont été effectuées. Elles ne sont pas présentées ici car elles n'indiquent pas d'anomalies particulières. Le puits Matjeka n'était pas accessible le jour de notre visite.

4.3.3 Données hydrogéochimiques

4.3.3.1 Conditions de prélèvements

Les prélèvements d'eaux souterraines mentionnés ci-dessus, et réalisés par nos soins, ont tenté de renouveler trois fois le volume d'eau inclus dans chaque ouvrage, à l'intérieur de la crépine mais aussi du massif filtrant. Des difficultés ont été rencontrées : concernant les piézomètres SC4 et SC6-2, les ouvrages ne réalimentaient pas, ce qui occasionnait le dénoisement très rapide de la crépine. Le piézomètre SC4 a été purgé une fois, puis prélevé le lendemain, après remontée de l'eau à son niveau initial. Le piézomètre SC6-2 a été vidé trois fois, les prélèvements ont été réalisés sur les deuxième et troisième vidanges. Les piézomètres SC5 et SC7 ont très bien réalimenté. Le pompage dans le SC7 a été ajusté pour occasionner un rabattement stabilisé, ce qui a fourni un débit de 8 l/min. Les puits privés contenant un volume d'eau trop conséquent pour être purgé trois fois (temps estimé pour une purge de 4-5 h), un pompage a été réalisé pendant 40-50 minutes, en vue de renouveler l'eau en partie. Un suivi de la conductivité électrique des eaux a été effectué en continu.

Le ruisseau Dachsgaben a été prélevé au niveau du pont situé à l'ouest de la maison Schorr.

Les fiches de prélèvements, qui contiennent tous les détails des opérations, sont fournies en annexe 9.

Les échantillons d'eaux souterraines ont été confiés à deux laboratoires :

- Laboratoire EUROFINs de Saverne pour les analyses des anions, des cations, du pH, de la conductivité, et du tritium ;
- Plateforme CONDATE OSUR à Rennes pour les analyses de datation sur les CFC (chlorofluorocarbones) et le SF6 (hexafluorure de soufre).

4.3.3.2 Résultats des analyses chimiques

Les bordereaux du laboratoire Eurofins sont fournis en Annexe 10. Ils sont synthétisés dans le tableau fourni en page suivante.

La balance ionique a été calculée par nos soins, à l'aide du logiciel *Diagrammes* de l'Université d'Avignon. Cela consiste à vérifier que la somme des cations est égale à celle des anions, pour les ions majeurs : calcium, magnésium, sodium et potassium pour les cations ; chlorures, sulfates, nitrates et bicarbonates pour les anions. On admet qu'une différence peut exister entre la somme des anions et celle des cations, mais elle ne doit pas excéder une erreur acceptable de 5 % (sommes exprimées en milliéquivalent par litre).

Le tableau ci-dessous récapitule les balances ioniques calculées pour les eaux analysées. Hormis pour le piézomètre SC6-2 qui présente une balance ionique de 7 %, sortant légèrement de la gamme de l'acceptable, toutes les autres valeurs sont convenables.

Ouvrages prélevés	Balance ionique calculée
SC4	2 %
SC5	0 %
SC6-2	7 %
SC7	1 %
Puits Schorr	2 %
Puits Matjeka	- 1 %
Puits communal	1 %
Ruisseau Dachsgaben	3 %

Tableau 4 – Balances ioniques calculées pour les analyses d'eaux réalisées par Eurofins

Référence EUROFINS : 15E075001-001 15E075001-002 15E075001-003 15E075001-004 15E075001-005 15E075001-006 15E075001-007 15E075001-008												
Référence Client : SC4 SC5 SC6-2 SC7 Puits communal Puits Schorr Puits Matjeka Ruisseau												
Tests	Paramètres	Unités	LQ									
Mesure du pH	pH			7,2	7,3	7,4	7,2	7,3	7,1	7,5	8	
	Température de mesure du pH	°C		18	17,9	17,9	17,9	17,9	17,9	17,9	17,9	
Conductivité à 25°C	Conductivité corrigée automatiquement à 25°C	µS/cm		7610	4170	2260	3210	1410	1940	1240	1950	
	Température de mesure de la conductivité	°C		18,1	18,1	18	18	18,1	18,1	18,1	18,1	
Titre Alcalimétrique (TA)	Titre Alcalimétrique simple (TA)	°F	2	<2.00	<2.00	<2.00	<2.00	<2.00	<2.00	<2.00	<2.00	
Titre Alcalimétrique Complet (TAC)	Titre Alcalimétrique complet (TAC)	°F	2	29,4	31,5	37,4	26,1	38,8	33,1	25,6	36,5	
Carbonates (CO3)	Carbonates	mg CO3/l		<24.0	<24.0	<24.0	<24.0	<24.0	<24.0	<24.0	<24.0	
Hydrogénocarbonates (HCO3)	Hydrogénocarbonates	mg HCO3/l		310	336	408	270	424	356	263	396	
Dureté Totale (TH)	Titre hydrotimétrique (TH)	°F	0,5	260,8	230,6	130,4	250,6	90,2	115,4	55,2	140,4	
Nitrates - Spectrophotométrie UV-Vis	Nitrates	mg NO3/l	1	<1.00	22,7	10,7	56,3	54,3	10,5	42,5	20,8	
	Azote nitrique	mg N-NO3/l	0,2	<0.20	5,14	2,41	12,7	12,25	2,38	9,61	4,7	
Nitrites - Spectrophotométrie UV-Vis	Nitrites	mg NO2/l	0,04	0,14	<0.04	0,06	0,35	<0.04	<0.04	<0.04	0,09	
	Azote nitreux	mg N-NO2/l	0,01	0,04	<0.01	0,02	0,11	<0.01	<0.01	<0.01	0,03	
Chlorures - Spectrophotométrie UV-Vis	Chlorures (Cl)	mg/l	1	999	266	65,3	62,7	132	24,2	176	26,9	
Sulfates (SO4) Spectrophotométrie UV-Vis	Sulfates	mg SO4/l	5	2580	2000	923	1840	126	808	51,4	816	
Orthophosphates (PO4) - Spectrophotométrie UV-Vis	Orthophosphates	mg PO4/l	0,1	0,12	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	0,81	0,1	
Bromures	Bromures (Br)	mg Br/l	0,5	3,4	<2.00	<1.00	<2.00	<0.50	<1.00	<0.50	<1.00	
Fluorures	Fluorures	mg/l	0,5	<0.5	<0.5	0,64	0,51	0,56	0,69	0,82	<0.5	
Aluminium (Al)	Aluminium	mg/l	0,05	0,94	0,41	2,45	0,23	<0.05	<0.05	<0.05	0,13	
Calcium (Ca)	Calcium	mg/l	1	526	512	327	503	128	323	80,7	313	
Fer (Fe)	Fer	mg/l	0,01	0,89	0,22	1,83	0,11	<0.01	0,12	0,03	0,2	
Magnésium (Mg)	Magnésium (Mg)	mg/l	0,01	244	206	139	232	78,8	88,4	35,4	114	
Potassium (K)	Potassium	mg/l	0,1	42,2	22,8	8,93	11,3	51,8	28,4	108	6,84	
Silicium (Si)	Silicium	mg/l	0,02	5,83	4,74	7,75	4,47	4,81	3,86	3,65	4,44	
Sodium (Na)	Sodium (Na)	mg/l	0,05	984	293	80,1	49,2	22,7	12,8	27,6	13	
Strontium (Sr)	Strontium	mg/l	0,005	10,6	13,9	40,3	11,6	1,73	12,1	3,99	7,14	
Manganèse (Mn)	Manganèse	µg/l	0,5	405	28,4	303	57,6	<0.50	291	0,68	134	
Silice (SiO2) (Dosage du Silicium nécessaire)	Silice (SiO2)	mg/l		12,5	10,2	16,6	9,57	10,3	8,27	7,81	9,51	
Activité en Tritium	Activité en Tritium	Bq/l		< 6	< 6	< 6	< 6	< 6	< 6	< 6	< 7	

Tableau 5 – Résultats des analyses chimiques et des analyses en tritium sur les eaux souterraines et le Dachsgaben

4.3.3.3 Interprétation des analyses d'eaux souterraines

Ces résultats indiquent tout d'abord que la conductivité électrique des eaux des piézomètres se trouve très supérieure (2260 à 7610 $\mu\text{S}/\text{cm}$) à celle des puits privés (1240 à 1950 $\mu\text{S}/\text{cm}$), même si cette dernière se trouve dans une gamme assez élevée pour des eaux circulant à faible profondeur. Les puits privés captent l'eau présente dans la zone altérée du Keuper, et non une nappe alluviale, ceci explique cette minéralisation.

Au droit du lotissement, la conductivité électrique des eaux du forage SC4 est très supérieure à celle des autres forages (SC4 : 7610 $\mu\text{S}/\text{cm}$, SC5 : 4170 $\mu\text{S}/\text{cm}$, SC6 : 2260 $\mu\text{S}/\text{cm}$, SC7 : 3210 $\mu\text{S}/\text{cm}$), lui conférant ainsi une particularité, qui sera également mise en évidence sur les analyses chimiques.

Le pH des eaux est globalement proche de la neutralité (7,2 à 7,4 sur les forages, 7,1 à 7,5 sur les puits privés).

Un diagramme de Piper est proposé dans la figure ci-dessous, sans, puis avec, les différents faciès chimiques reportés à l'intérieur de polygones. Un diagramme de Piper utilise les éléments majeurs pour représenter les différents faciès des eaux souterraines. Il s'agit d'une approche descriptive et comparée qui permet de représenter sur un même graphique un certain nombre de points de mesures autorisant des regroupements par familles présentant des faciès similaires.

L'utilisation du diagramme de Piper permet d'apporter un premier éclairage sur le contexte géochimique de l'hydrosystème autour et au pied du lotissement Weingarten à Lochwiller. Il ressort de manière évidente que le contexte géochimique des différentes composantes de l'hydrosystème est hétérogène spatialement. Le triangle des cations présenté en bas à gauche montre des eaux, à la fois pour les forages et pour les puits privés et le ruisseau, plutôt calciques, en particulier le puits Schorr, et les forages SC7 et SC6-2. Le forage SC4 montre un faciès plus sodique et potassique. Une tendance magnésienne moyenne est mise en évidence pour l'ensemble des eaux. Concernant les anions, les forages SC4 à SC7, le puits Schorr et le ruisseau montrent un faciès sulfaté indéniable, contrairement aux puits communal et Matjeka. Ces deux derniers montrent en sus une tendance carbonatée/bicarbonatée bien supérieure à celles des autres ouvrages et du ruisseau. Le puits Matjeka tend par ailleurs vers un faciès chloruré.

Globalement les faciès affichés par les eaux sont à tendance chlorurée et sulfatée, calcique et magnésienne, en particulier pour les piézomètres, le puits Schorr et le ruisseau. Le puits Schorr semble donc subir une influence des eaux souterraines du coteau, cela appuie la carte piézométrique proposée plus haut. La carte suppose en effet une circulation des eaux du secteur Kandel (forage géothermique) vers le puits Schorr. Le puits communal et le puits Matjeka se détachent nettement des autres ouvrages cités, montrant un faciès davantage carbonaté/bicarbonaté plutôt que sulfaté.

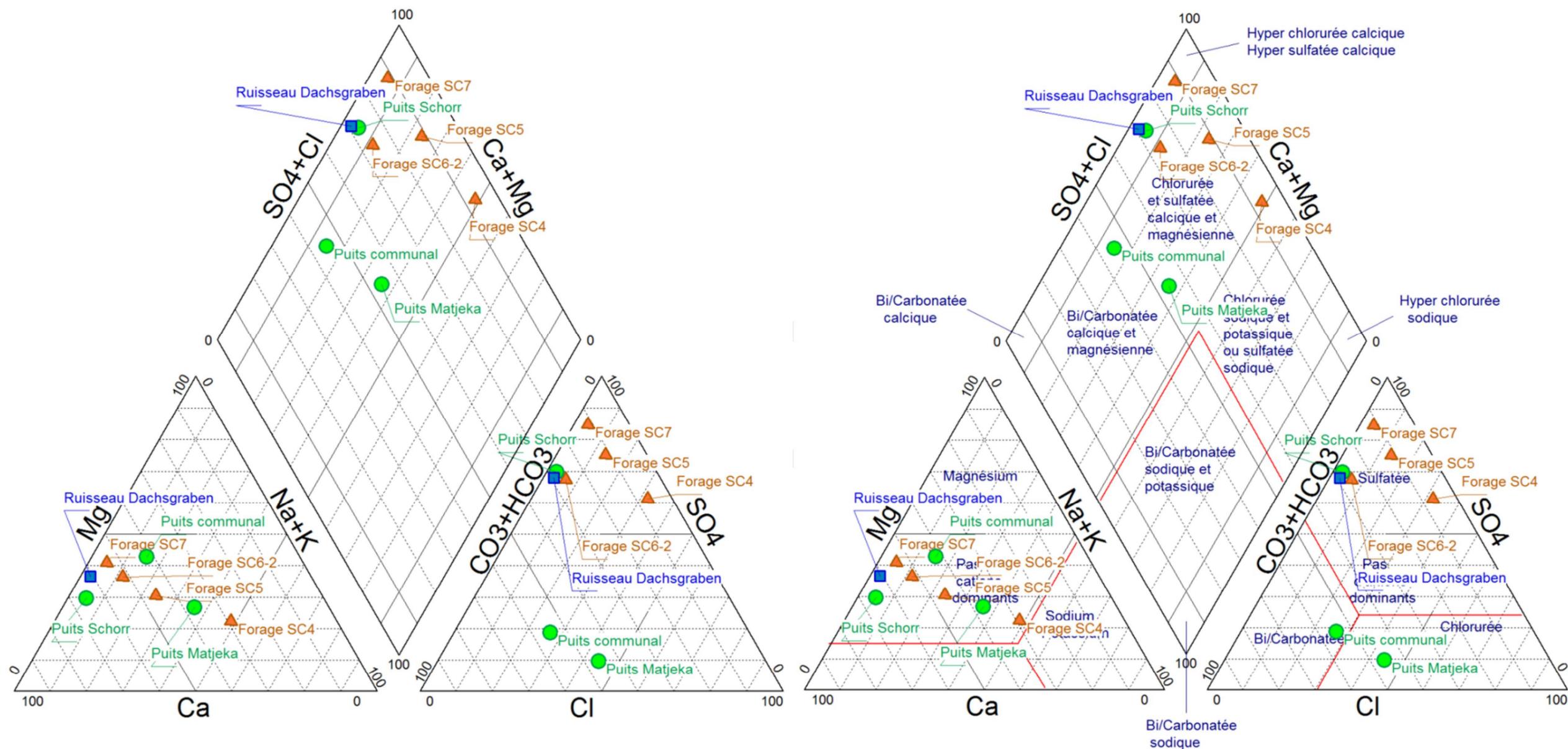


Figure 33 – Diagrammes de Piper des eaux analysées à Lochwiller, sans (à gauche) et avec (à droite) les polygones de faciès (triangles oranges : piézomètres, ronds verts : puits privés, carré bleu : ruisseau Dachsgaben)

Le diagramme de Schoeller-Berkaloff (Figure 34) représente chaque analyse par une ligne brisée, profil caractéristique de la concentration de chaque ion majeur en solution dans l'eau, les six échelles logarithmiques à égale distance les unes des autres, étant décalées de façon à aligner les valeurs unitaires des milliéquivalents des différents anions et cations. Les profils obtenus permettent de mettre en évidence la parenté des eaux entre elles.

Celui construit sur les analyses chimiques des eaux de Lochwiller (Figure 34) met bien en évidence la nature très sulfatée, calcaïque, magnésienne des eaux des piézomètres en place sur le lotissement. La richesse des eaux en sulfates et en calcium provient du contact avec l'anhydrite et le gypse, ces minéraux sont solubles et en cours de transformations minéralogiques. Le piézomètre SC4 présente les concentrations les plus élevées en calcium (526 mg/l), magnésium (244 mg/l), sodium (984 mg/l), potassium (42,2 mg/l), chlorures (999 mg/l) et sulfates (2580 mg/l), ce qui l'individualise particulièrement sur le graphique. Sa teneur en nitrates (< 1 mg/l), très faible au regard de celles des autres ouvrages (jusqu'à 56,3 mg/l en SC7), l'individualise également, et semble mettre en évidence l'origine plutôt souterraine des eaux, au regard d'une composante plus superficielle des autres eaux souterraines analysées. Les nitrates ont en effet pour origine les engrais utilisés en agriculture.

Les eaux du forage SC5 présentent le même faciès que celles du forage SC4, toutefois plus diluées, notamment en sodium (293 mg/l) et potassium (22,8 mg/l), en chlorures (266 mg/l) et en sulfates (2000 mg/l). Les eaux des forages SC6-2 et SC7 apparaissent dans les mêmes gammes de concentrations en calcium et magnésium, mais dans des gammes moins concentrées en sodium et potassium, et en chlorures. Les eaux du forage SC6 contiennent moins de calcium (327 mg/l) et de sulfates (923 mg/l) que celles de SC7 (503 mg/l et 1840 mg/l respectivement), probablement du fait d'un apport d'eaux moins minéralisées issues du pied de versant (secteur du puits communal) et de la « jeunesse » relative de l'aquifère au regard du retard du début de gonflement.

De ces observations, il ressort que les eaux des quatre forages sont riches en sulfates et en calcium, ces éléments minéraux étant issus de la dissolution des évaporites présentes au même niveau que les crépines des piézomètres. Les forages SC4 et dans une moindre mesure SC5, présentent une composante supplémentaire chlorurée, sodique et potassique. Pour les chlorures et le sodium, il semble qu'ils proviennent d'un mélange avec des eaux plus profondes, remontées via le forage géothermique fuyard supposé. Les teneurs en potassium sont plus difficiles à interpréter, cet élément étant largement présent dans les engrais et pouvant en conséquence être apporté par les eaux superficielles qui se sont infiltrées au droit de champs ou de jardins potagers amendés.

Les eaux du puits Schorr sont celles qui se rapprochent le plus des eaux des piézomètres, du point de vue du calcium (323 mg/l), du magnésium (88 mg/l), et des sulfates (808 mg/l). Cela indique un mélange avec des eaux issues de l'aquifère développé au droit de la colline, comme cela avait été mis en évidence dans l'expertise de Plume, réalisée dans le cadre de l'expertise judiciaire [23]. Cette observation corrobore également l'esquisse piézométrique proposée au § 4.3.1.1 (Figure 27).

Le puits Matjeka présente les concentrations les plus faibles en calcium (81 mg/l), en magnésium (35 mg/l), et en sulfates (51 mg/l), de même que le puits communal. En revanche, leurs teneurs en sodium, potassium, nitrates et chlorures ne sont pas négligeables, ce qui pourrait traduire une influence du salage de la chaussée en hiver (sodium et chlorures) et de l'utilisation d'engrais dans les jardins potagers proches (nitrates et potassium).

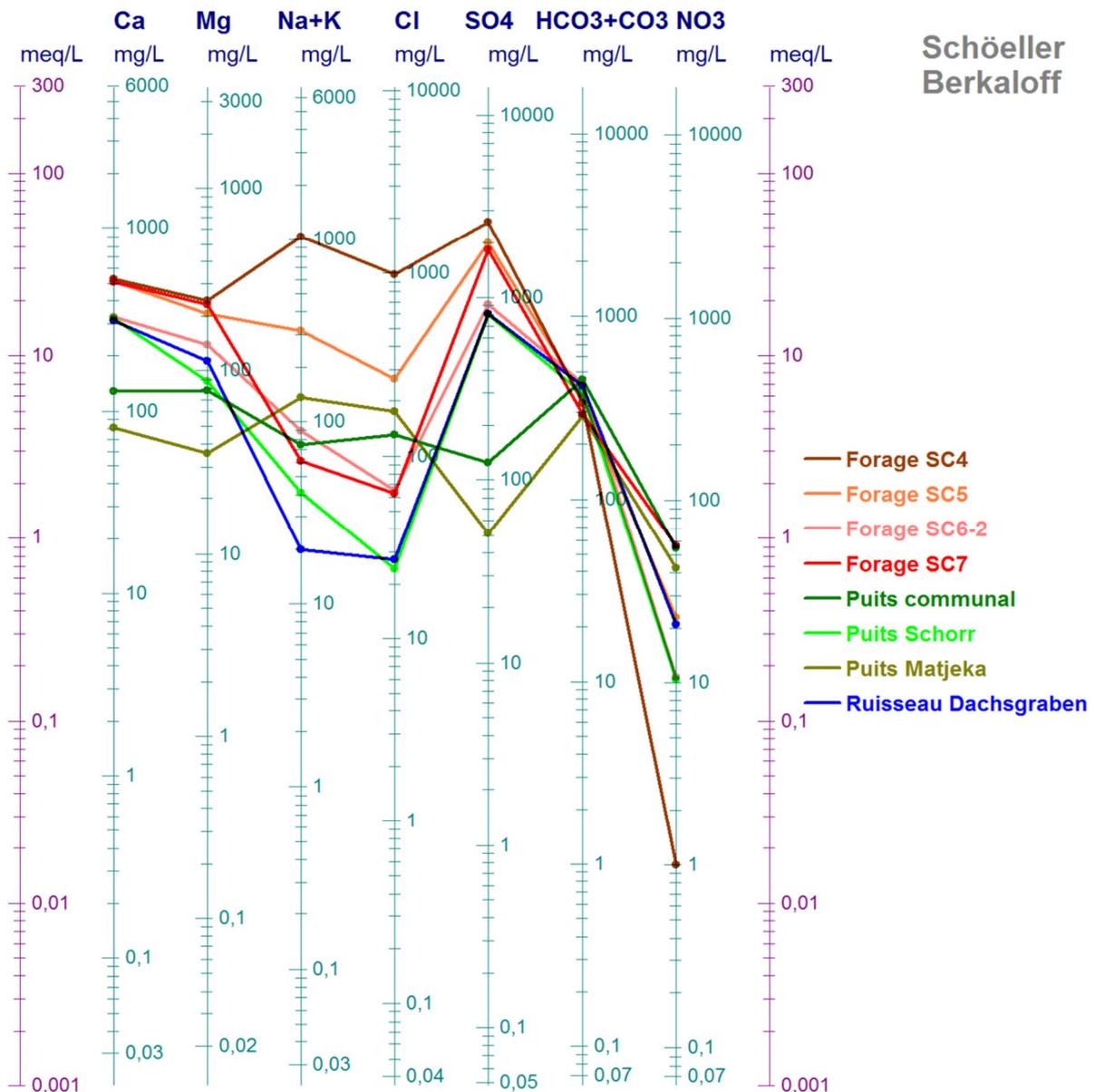


Figure 34 – Diagramme de Schoeller-Berkaloff

Enfin, un dernier diagramme est proposé, le diagramme de Stiff, qui permet d'obtenir une figure géométrique polygonale caractéristique d'une famille d'eau donnée. Les concentrations des ions majeurs sont reportées sur des axes horizontaux de part et d'autre de l'axe vertical d'origine. Les cations sont représentés à gauche et les anions à droite. Ce diagramme produit des représentations individuelles de faciès chimiques.

Ce diagramme construit sur les analyses chimiques des eaux de Lochwiller, très visuel, montre clairement la minéralisation importante des eaux pompées dans le forage SC4, et notamment leur composante sodique, potassique, sulfatée, chlorurée, calcique et magnésienne. Les eaux des forages SC5 et SC7 indiquent le même type de faciès que les eaux de SC4, sans la composante sodique et chlorurée, comme vu auparavant. Les concentrations sont globalement plus faibles, ce qui apparaît encore davantage sur les eaux de SC6-2. Les eaux des puits privés sont nettement moins concentrées, sauf celles du puits Schorr, dont la composante sulfatée, calcique et magnésienne est confirmée.

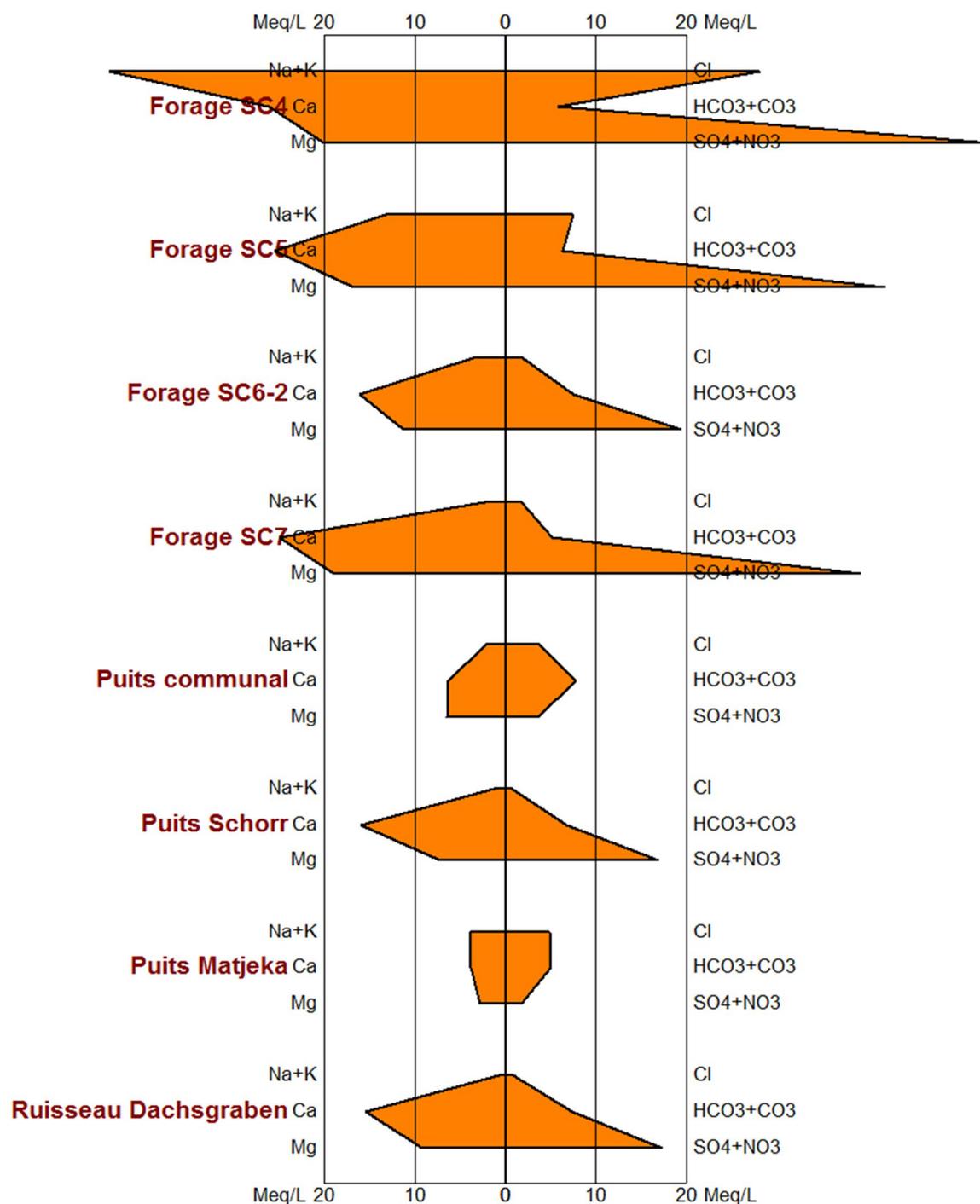


Figure 35 – Diagramme de Stiff

En dehors des ions majeurs, on notera une composante particulière en manganèse des eaux du forage SC4 (405 µg/l) et du forage SC6-2 (303 µg/l), alors que les eaux des autres forages en sont beaucoup plus pauvres (SC5 : 28,4 µg/l et SC7 : 57,6 µg/l). Les eaux du puits Schorr sont également relativement riches en manganèse (291 µg/l), au regard des concentrations de ce minéral dans le puits communal (< 0,50 µg/l) et dans le puits Matjeka (0,68 µg/l). Cela confirme une fois de plus que le puits Schorr contient un mélange d'eaux du Keuper altéré du bas du village et du Keuper en cours de gonflement au droit du lotissement, par ailleurs enrichi, selon nous, en eaux souterraines profondes issues du forage géothermique captant le Muschelkalk.

Les eaux du ruisseau Dachsgaben, qui s'écoule dans le village, présentent un faciès très proche de celui du puits Schorr, c'est-à-dire intermédiaire entre les eaux souterraines du lotissement où le gonflement est en cours et génère une composante sulfatée-calcique et magnésienne, et les eaux souterraines du Keuper altéré, faciès représenté par les eaux du puits communal et du puits Matjeka. Ce ruisseau écoulait donc des eaux apportées par le Keuper altéré traversé en amont, avec une composante d'eaux de Keuper « sain » contenant du calcium, et une quantité non négligeable de sulfates. On peut supposer que des phénomènes de dissolution de gypse sont en cours en amont de Lochwiller.

4.3.3.4 Etat de saturation des eaux vis-à-vis du gypse et de l'anhydrite

Le logiciel *Diagrammes*, déjà cité, fait appel au logiciel *Phreeqc* pour le calcul des indices de saturation des eaux vis-à-vis de différents minéraux.

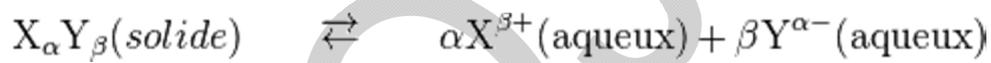
L'indice de saturation se calcule comme suit :

$$IS = \log(Qs / Ks)$$

avec :

- Qs = le produit des concentrations des ions constitutifs du minéral en milieu aqueux (en mol/l),
- Ks = le produit de solubilité du minéral, calculé de la façon suivante, à l'équilibre chimique :

si la dissolution du minéral est décrite par la réaction suivante :



Le produit de solubilité est :

$$K_s = [X^{\beta+}]^{\alpha} \cdot [Y^{\alpha-}]^{\beta}$$

L'indice de saturation s'interprète comme suit :

- si IS = 0, les eaux et les phases minérales solides sont à l'équilibre chimique, il n'y a ni dissolution, ni cristallisation ;
- si IS > 0, les eaux sont sursaturées vis-à-vis du minéral, qui aura tendance à cristalliser ;
- si IS < 0, les eaux sont sous-saturées vis-à-vis du minéral, qui aura tendance à s'y dissoudre.

Les résultats des calculs pour les eaux souterraines prélevées à Lochwiller indiquent les résultats suivants :

	<i>Anhydrite</i>	<i>Gypse</i>	<i>Calcite</i>	<i>Dolomite</i>	<i>Quartz</i>	<i>Halite</i>
Forage SC4	-0,3	-0,06	0,34	0,6	0,42	-4,72
Forage SC5	-0,32	-0,08	0,53	0,92	0,33	-5,79
Forage SC6-2	-0,67	-0,43	0,63	1,15	0,53	-6,92
Forage SC7	-0,34	-0,1	0,36	0,63	0,3	-7,18
Puits communal	-1,69	-1,45	0,34	0,73	0,32	-7,12
Puits Schorr	-0,68	-0,44	0,32	0,34	0,23	-8,14
Puits Matjeka	-2,16	-1,92	0,19	0,28	0,2	-6,9
Dachsgraben	-0,7	-0,46	1,23	2,27	0,29	-8,09

Tableau 6 – Indices de saturation calculés pour les eaux souterraines de Lochwiller, vis-à-vis de différents minéraux

Ces résultats mettent en évidence que les eaux sont sous-saturées vis-à-vis de l'anhydrite mais aussi, étonnamment, sous-saturées vis-à-vis du gypse. Celui-ci, en effet, présente un produit de solubilité inférieur à celui de l'anhydrite (à température, salinité, pH des eaux égaux par ailleurs), il précipite donc à des concentrations en sulfates et en calcium inférieures à celles nécessaires à la précipitation de l'anhydrite. Les eaux des forages SC4, SC5 et SC7 sont plus proches de l'équilibre chimique que les eaux du forage SC6 (nous avons vu plus haut qu'un apport d'eaux peu minéralisées provenant du pied de versant était probable), et surtout des puits privés. Il est probable que cet état de sous-saturation des solutions en circulation dans le sous-sol, et prélevées par nos soins, soit celui des eaux circulant le plus facilement dans le sous-sol, à la faveur des fractures, ou des bancs disjoints. Il est donc possible que les eaux peu minéralisées issues des infiltrations des eaux météoriques et des eaux profondes provenant du forage géothermique fuyard diluent les eaux présentes au contact du gypse et de l'anhydrite, plus riches en sulfates et en calcium, les faisant passer à un état sous-saturé. L'apparition d'un gonflement au droit du lotissement, issu de la précipitation du gypse, témoigne du fait que certaines eaux, certainement moins mobiles que les eaux que nous avons pu prélever lors des pompages à l'intérieur des ouvrages, sont sursaturées vis-à-vis de ce minéral. Il s'agit très probablement d'eaux interstitielles, contenues dans la porosité des bancs d'argilites et d'anhydrite.

Concernant les autres minéraux, les eaux de Lochwiller sont toutes sursaturées vis-à-vis de la calcite, de la dolomite et du quartz, ce qui signifie qu'elles contiennent des teneurs en calcium, carbonates/bicarbonates, magnésium, et silice suffisamment élevées pour que ces minéraux aient tendance à précipiter au sein du milieu souterrain. Les eaux sont en revanche sous-saturées vis-à-vis de la halite, qui est, rappelons-le, constituée de chlorure de sodium.

4.3.4 Données de datation des eaux

4.3.4.1 Méthodes utilisées

- Le tritium

Il s'agit d'un isotope radioactif de l'hydrogène, qui est considéré comme un élément dateur des eaux souterraines, car il se désintègre (demi-vie de 12,32 ans). Il permet d'estimer le temps de séjour moyen des eaux d'un aquifère. Produit naturellement dans l'atmosphère, les teneurs dans les précipitations ont tout d'abord augmenté, suite aux essais thermonucléaires aériens de 1952 à 1963, pour ensuite diminuer et se stabiliser à une teneur supérieure à la teneur naturelle de 5 UT (Figure 37). Actuellement, la teneur moyenne se situe à un niveau très faible, entre 10 et 30 UT, soit entre 1,18 Bq/l et 3,54 Bq/l.

Grâce au suivi des teneurs en ³H des précipitations, il est possible de déterminer le temps de séjour moyen des eaux souterraines d'un aquifère à l'aide de modèles mathématiques qui, à

partir d'un signal d'entrée (teneurs en ^3H dans les précipitations) et d'un signal de sortie (teneurs en ^3H dans les eaux souterraines d'un aquifère), calculent le meilleur ajustement possible entre les sorties calculées et les valeurs mesurées. De cet ajustement, on en déduit le temps de séjour moyen.

Ces études isotopiques utilisent classiquement trois types de modèles suivant la façon dont les eaux se mélangent en traversant un milieu poreux : le modèle mélange, le modèle piston appelé encore exponentiel, ou à recharge continue et le modèle dispersif. Cet ensemble de modèles peut être généralisé en différenciant temps de séjour moyen et âge d'une molécule d'eau.

1. Ou bien la pluie efficace se mélange complètement à l'eau de l'aquifère et la teneur en ^3H à la sortie du système est identique à celle répartie uniformément dans tout l'aquifère : le modèle est de type mélange ou exponentiel, ou encore à recharge continue. Ceci implique que toute section du réservoir contient, dans les mêmes proportions, des molécules d'eau de tous les âges et que les eaux à l'exutoire sont représentatives de celles de l'aquifère.
2. Ou bien la pluie efficace traverse l'aquifère à vitesse constante comme un écoulement d'eau dans un tuyau et toutes les molécules d'eau ont le même temps de séjour : le modèle est de type piston.
3. Compte tenu de l'hétérogénéité du milieu entraînant des différences de vitesses entre les pores et entre plusieurs couches de l'aquifère, il peut résulter une dispersion du signal tritié de la pluie par rapport à la direction principale de l'écoulement. Plus la dispersion augmente et plus le signal de sortie tend vers celui du modèle de mélange parfait. Inversement, si la dispersion diminue le signal se rapproche du modèle piston. Les modèles mélange et piston constituent donc les cas limites du modèle dispersif, ou binaire.

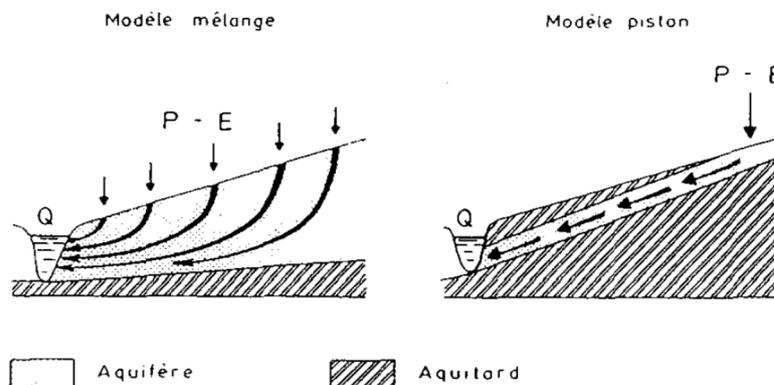


Figure 36 – Représentation schématique des écoulements souterrains de types mélange (= exponentiel, = à recharge continue) et piston [26]

- Les gaz dissous

Les chlorofluorocarbones (CFC) et l'hexafluorure de soufre (SF_6)⁴ sont des gaz anthropiques dont la production n'a commencé qu'au milieu du XX^{ème} siècle. Toute trace de ces gaz dans une nappe souterraine indique donc la présence d'une eau de moins de 50 ans, dans laquelle ils sont dissous.

⁴ CFC : Chlorofluorocarbones plus connus sous leur nom commercial : Fréons. Gaz anthropiques servant de gaz propulseurs, réfrigérants ou solvants également gaz à effet de serre et destructeur de la couche d'ozone (interdits par le protocole de Montréal).

SF6 : Hexafluorure de soufre. Gaz isolant utilisé en industrie.

La datation des eaux par les CFC et le SF6 a été rendue possible par la connaissance de :

- leurs concentrations atmosphériques sur les 50 dernières années par le suivi de la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) et les reconstitutions historiques à partir des données fournies par les industriels sur les ventes (concentrations identiques en tout point d'un même hémisphère) (Figure 37) ;
- leurs caractéristiques chimiques et en particulier leur solubilité dans l'eau ;
- l'existence de techniques analytiques permettant la détection et la quantification de ces gaz dans l'eau à de très faibles concentrations.

Les CFC permettent non seulement de dater les eaux de manière qualitative (l'eau s'est-elle rechargée avant 1950 ou après) mais aussi quantitative sur les 50 dernières années.

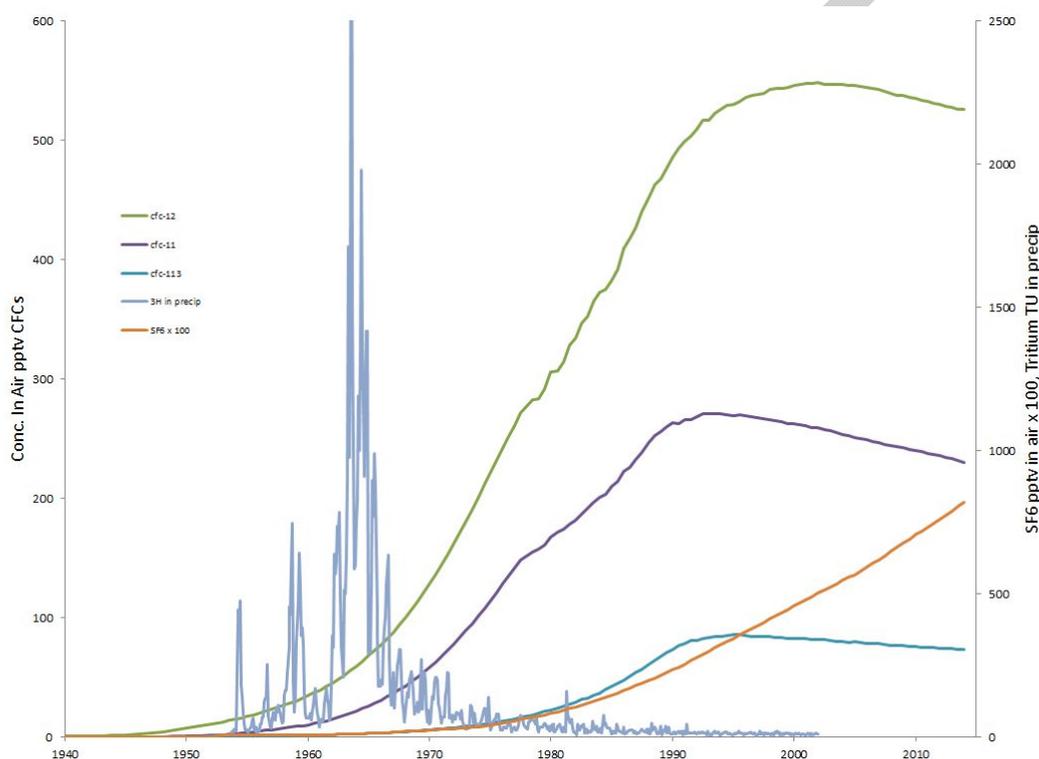


Figure 37 – Evolution dans le temps, depuis 1940, des concentrations en tritium, CFC et SF6 dans l'atmosphère terrestre

4.3.4.2 Résultats des analyses

Le tritium a été analysé par le laboratoire Eurofins, à des fins de datation de l'infiltration des eaux présentes dans le sous-sol. Malheureusement les teneurs sont toutes inférieures à la limite de quantification du laboratoire, qui est de 6 Bq/l (cf. Tableau 5 page 50 et Annexe 10).

Les analyses des CFC et SF6 dissous dans les eaux ont été réalisées par la plateforme CONDATE Eau de l'Observatoire des Sciences de l'Univers (OSUR) de Rennes (cf. Annexe 11).

- Piézomètres

L'analyse sur les eaux de SC4 donne des résultats plutôt caractéristiques d'un mélange d'eaux anciennes (30-40 ans, selon teneurs en CFC) (issues du forage géothermique ?) et d'eaux plus récentes (la teneur en SF6 indique une concentration caractéristique de 2010).

Les analyses effectuées sur les eaux du forage SC5 fournissent des âges non cohérents, autour de 35-40 ans, mais avec du CFC12 en excès. Il s'agirait selon le laboratoire d'un mélange complexe d'eaux d'âges différents.

Sur les eaux du forage SC6-2, les âges obtenus sont d'environ 35 ans, si l'on considère un modèle piston. S'il s'agit d'un mélange binaire, ce qui est plus probable, le laboratoire l'interprète comme un mélange de 20-40 % d'eau récente, avec une eau de 40-45 ans. Cette dernière pourrait être issue du forage géothermique, toutefois les analyses chimiques n'indiquent pas un faciès à tendance chlorurée-sodique comme sur les eaux de SC4, ou plutôt des circulations lentes issues de l'infiltration plus haut sur la colline, qui se produisent au sein du Keuper (secteur SC7 et plus haut). Cela est confirmé par les résultats sur les eaux du piézomètre SC7, qui indiquent des eaux plus anciennes que les précédentes, 40-45 ans pour un modèle piston, > 200 ans pour un modèle à recharge continue, et dans le cas d'un modèle binaire, il s'agirait d'une eau de 40 ans ou plus mélangée 10-20 % d'eau récente.

- Puits privés

Les résultats sur le puits Schorr indiquent un âge d'environ 40 ans, sauf pour le SF6 qui indique une infiltration vers 2005. Il s'agirait selon le laboratoire d'un mélange complexe d'eaux d'âge différent.

Les analyses effectuées sur les eaux du puits communal ne sont pas interprétables : le SF6 indique une infiltration autour de 2013, le CFC-113 autour de 1977, et les deux autres sont en excès.

Les eaux du puits Matjeka n'ont pas été analysées.

4.4 Analyses géotechniques

Le rapport de Géorressources placé en Annexe 12 fournit le détail des analyses géotechniques réalisées :

- ρ_h , ρ_d et ρ_s : masses volumiques « naturelle », sèche et des grains ;
- W : teneur en eau « naturelle » ;
- n : porosité calculée ;
- S_r : degré de saturation ;
- Limites d'Atterberg : W_L : limite de liquidité, W_p : limite de plasticité, I_p : indice de plasticité, I_c : indice de consistance ;
- V.B.S. : valeur au bleu de méthylène.

4.4.1 Limites d'Atterberg et valeurs de bleu de méthylène

4.4.1.1 Principes

On distingue trois états possibles pour un sol à teneur en eau croissante, les états solide, plastique, et liquide. Pour fixer des critères de détermination entre ces différents états d'un même sol, on utilise les limites d'Atterberg qui sont des grandeurs semi-empiriques dont la détermination est fixée d'une manière normative. Pour préciser les états, on observe à teneur en eau croissante (Figure 38) :

- un état solide sans retrait : le sol est très peu déformable et son volume est indépendant de la teneur en eau si celle-ci reste inférieure à la limite de retrait W_R ,

- un état solide avec retrait : le sol est très peu déformable et son volume change avec la teneur en eau si celle-ci varie entre la limite de retrait et la limite de plasticité W_P ,
- un état plastique : le sol a une cohésion notable mais se déforme sous l'effet de charges assez faibles pour une teneur en eau comprise entre la limite de plasticité et la limite de liquidité W_L ,
- un état liquide : le sol a une cohésion très faible et il a l'aspect d'un liquide.

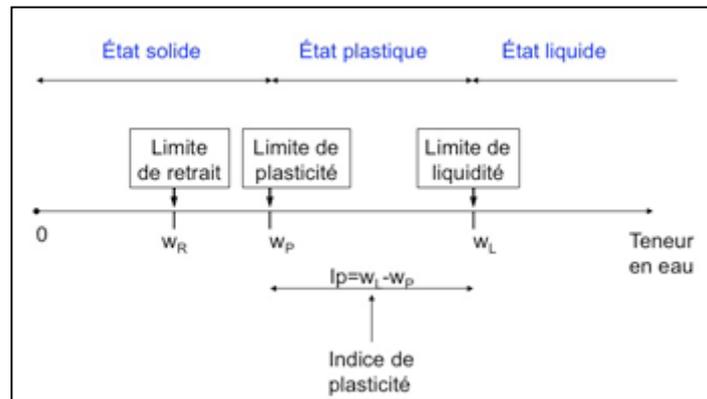


Figure 38 - Limites d'Atterberg

Les différentes grandeurs W_R , W_P , et W_L sont des valeurs caractéristiques (intrinsèques) d'un sol, elles dépendent fortement de sa composition minéralogique et des cations échangés dans les argiles.

À partir des grandeurs W_L et W_P , on définit l'indice de plasticité I_P d'un sol : $I_P = W_L - W_P$.

Cet indice caractérise l'étendue du domaine de teneur en eau dans lequel le sol a un comportement plastique, et contient une quantité d'eau suffisante pour ne pas passer à l'état solide ($W < W_P$). Il est très fortement lié à la quantité et à la nature des minéraux argileux présents dans le sol et à la surface spécifique des sols. Plus le sol possède de minéraux argileux actifs dans l'interaction avec l'eau, plus il sera nécessaire d'ajouter de l'eau au sol pour qu'il devienne liquide. En effet, une grande partie de cette eau sera adsorbée par la forte proportion en particules argileuses, empêchant le sol de passer à l'état liquide et restera à l'état pâteux, ce qui correspond à la phase plastique. Lorsque la capacité d'adsorption en eau sera atteinte pour $W > W_L$, toute l'eau en excès restera à l'état libre, c'est l'état « liquide » [27].

La classification des sols en fonction de leur indice de plasticité est la suivante :

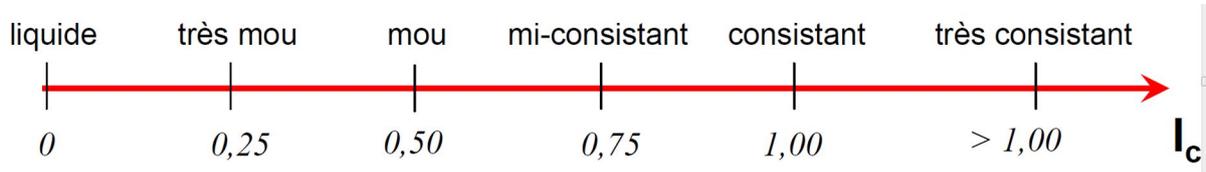
I_P	Plasticité
0	non plastique
1-5	très faiblement plastique
5-15	moyennement plastique
15-40	plastique
>40	très plastique

Tableau 7 - Classification des sols en fonction de leur indice de plasticité

$$I_c = \frac{w_l - w}{I_p}$$

L'indice de consistance se calcule comme suit :

Il caractérise la consistance du sol, selon les critères suivants :



Casagrande a établi un diagramme de plasticité représentant l'évolution de l'indice de plasticité I_p en fonction de la limite de liquidité W_L . Ce graphique permet de distinguer et de classer les sols fins argileux ou limoneux en fonction de leur plasticité (Figure 39) [23]. Dakshanamurthy et Raman [28] se sont inspirés de ce diagramme pour établir une classification du potentiel de gonflement des sols. D'après Dakshanamurthy et Raman, il est possible d'apprécier le potentiel de gonflement à partir de la limite de liquidité W_L . Pour cela, les auteurs ont repris le diagramme de Casagrande et ont procédé au découpage de la ligne A en six zones à la suite d'observations en laboratoire. Ils ont pu ainsi constater que lorsque les échantillons dépassaient une limite de liquidité de 45 %, les sols avaient tendance à prendre du volume et donc à gonfler.

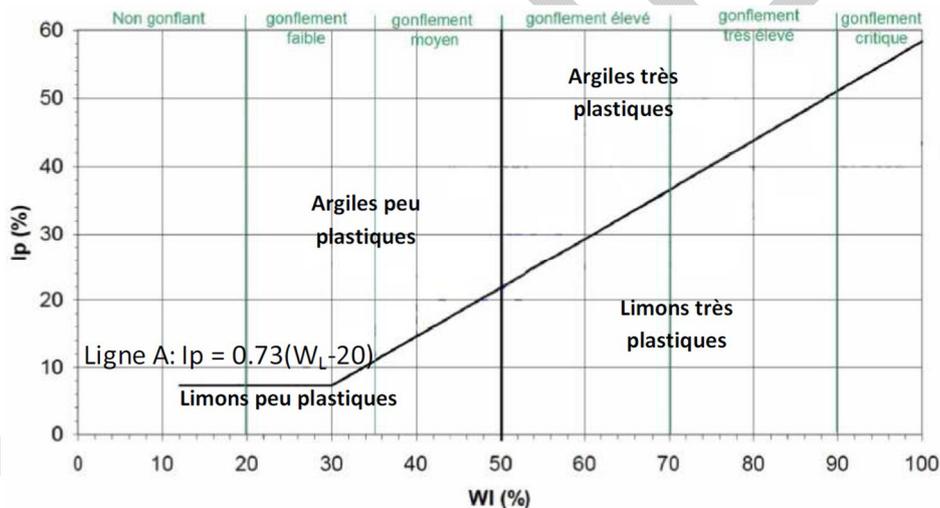


Figure 39 - Corrélation entre les propriétés du sol et le potentiel de gonflement – Diagramme de Casagrande et classification de Dakshanamurthy et Raman (1973) (tiré de [29])

D'autre part, l'essai au bleu de méthylène consiste à injecter une certaine quantité de bleu de méthylène, qui est adsorbée préférentiellement par les particules argileuses. Cet essai permet ainsi de mesurer la capacité d'adsorption en eau de la surface spécifique des argiles. Plus un sol absorbe de bleu, plus le sol contient des minéraux argileux actifs développant des surfaces spécifiques internes (espace interfoliaire) et externes (espace interparticulaire) importantes [27]. Cette surface est très représentative du minéral argileux prépondérant dans la phase argileuse. La valeur VBS s'exprime en masse de bleu pour 100 g de sol.

VBS	Type de sol
0,1	Sol insensible à l'eau
0,2	Seuil au-dessus duquel le sol est sensible à l'eau.
1,5	Seuil distinguant les sols sablo- limoneux des sols sablo- argileux.
2,5	Seuil distinguant les sols limoneux peu plastiques de sols limoneux moyennement plastiques
6	Seuil distinguant les sols limoneux et les sols argileux
8	Seuil distinguant les sols argileux des sols très argileux.

Tableau 8 – Classification des sols en fonction de la valeur de bleu VBS

Chassagneux *et al.* [30] ont établi des seuils de sensibilité des sols argileux au retrait-gonflement à partir de la valeur de bleu VBS (Tableau 9). Ces critères sont utilisés dans la classification géotechnique GTR⁵, en complément de l'indice de plasticité, afin de classer les sols fins suivant leur sensibilité à l'eau.

Valeur de bleu VBS	Sensibilité
< 2,5	Faible
2,5 – 6	Moyen
6 – 8	Forte
> 8	Très forte

Tableau 9 – Sensibilité d'une argile au retrait-gonflement d'après [26]

4.4.1.2 Résultats obtenus sur les phases argileuses des terrains de Lochwiller

Les valeurs obtenues par Géoressources sur les marnes et argilites de Lochwiller sont les suivantes :

Echantillon	Profondeur	W _L	W _P	I _P	I _c	VBS
SC4-2	3,4-3,6	39	32	7	2,1	3,74
SC4-4	7,5-7,6	38	32	6	2,5	3,36
SC5-1	3,8-4,0	39	31	8	3,1	2,50
SC5-3	7,10-7,25					2,13
SC6-2	6,3-6,45	43	36	7	3,8	2,73
SC6-5	17,85-18,0					1,62
SC7-9	10-10,12	34	29	5	3,7	
SC7-11	27,05-27,20					1,75
SC7-13	36,10-36,25					1,32

Tableau 10 – Résultats des mesures de limites d'Atterberg et valeur de bleu de méthylène

Les indices de plasticité indiquent des terrains faiblement à moyennement plastiques. Les indices de consistance, quant à eux, montrent des terrains très consistants. Reportés sur le diagramme de Casagrande, modifié par Dakshanamurthy et Raman, les sols de Lochwiller, du point de vue de leurs composants argileux uniquement (les minéraux sulfatés ne sont pas pris en considération), sont classifiés dans les limons peu plastiques, avec un potentiel de gonflement moyen.

Les valeurs de bleu indiquent par ailleurs des sols limoneux peu plastiques à moyennement plastiques. La sensibilité des sols au retrait-gonflement des terrains d'après [30] serait faible à moyenne.

⁵ GTR : Guide Technique pour la Réalisation des remblais et des couches de forme

4.4.2 Essais de gonflement ou essais œdométriques

4.4.2.1 Définition, objectifs et protocole des essais

Le comportement gonflant par hydratation (d'anhydrite et/ou d'argiles) des sols et des roches peut être testé en laboratoire par des essais de gonflement, encore appelés essais œdométriques. Ils consistent en l'introduction d'un échantillon rocheux sélectionné et taillé sous forme cylindrique (20 mm de hauteur, 40 mm de diamètre) dans un œdomètre. Il s'agit d'une cellule qui permet uniquement la déformation axiale d'un échantillon (la déformation radiale est maintenue constante par les parois de la cellule). La contrainte axiale exercée sur l'échantillon est maîtrisée. Une pression interstitielle est maintenue stable tout au long de l'essai, à l'aide de deux injecteurs, situés aux deux extrémités de l'éprouvette. Le fluide injecté est de l'eau recueillie sur site.

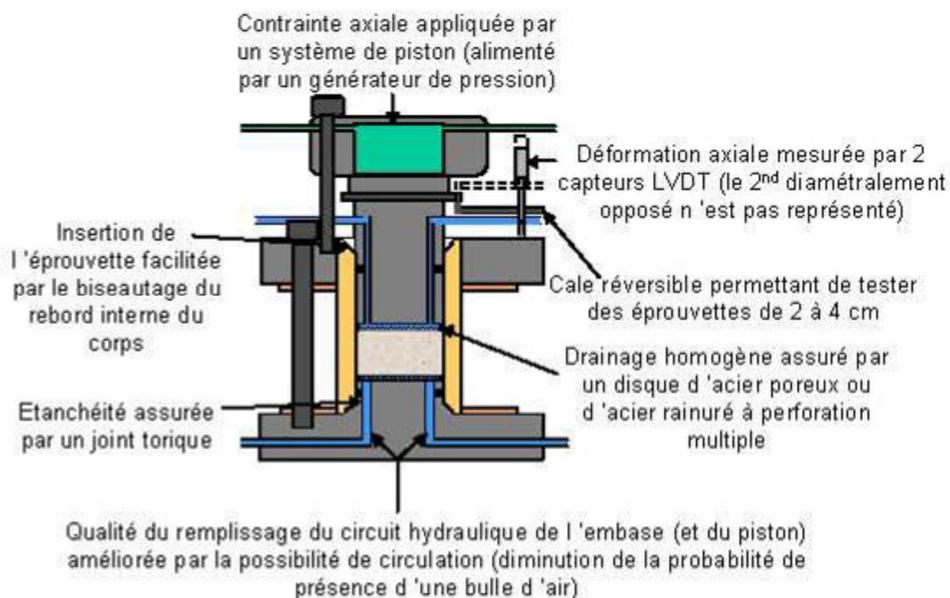


Figure 40 - Représentation schématique de la cellule œdométrique (source : Géoressources Annexe 13)

Géoressources a proposé deux protocoles, le premier aboutissant à l'évaluation de la pression de gonflement, et le second au potentiel de gonflement, grandeurs qui, selon ce laboratoire, sont à peu de choses près équivalentes.

Le protocole retenu est le second. Il se définit comme suit :

On laisse se déformer axialement l'échantillon (les déplacements radiaux sont bloqués par l'anneau œdométrique) puis après stabilisation, on augmente la force axiale pour revenir à la hauteur initiale de l'échantillon. Les étapes sont les suivantes :

- Chargement axial équivalent à la profondeur de prélèvement - Attente de la stabilité en déplacement axial.
- Injection en amont et aval du fluide (eau prélevée par GEODERIS sur le forage SC4) avec une pression d'injection pouvant correspondre à celle présente *in situ*.
- Enregistrement de l'augmentation du déplacement axial avec un capteur de déplacement ayant une sensibilité de 0,001 mm. Attente de la stabilité du déplacement.
- Augmentation de la force pour retrouver la hauteur initiale de l'échantillon.

Géoressources précise que la difficulté de ces mesures est fortement liée à la nature hétérogène du matériau. Une attention particulière est donnée quant à la représentativité entre l'analyse minéralogique et la pression de gonflement mesurée. Le laboratoire procède donc à l'analyse minéralogique de l'échantillon avant et après l'essai œdométrique afin de vérifier l'évolution géochimique du matériau.

4.4.2.2 Résultats obtenus au 26 janvier 2016

Au moment de la rédaction du présent rapport, l'avancement des essais œdométriques est le suivant. Trois premiers essais ont été initiés le 21 août 2015 sur les échantillons SC4-7 (prélevé à 210,65 m), SC4-20 (prélevé à 205,5 m) et SC7-16 (prélevé à 204,05 m) et deux essais supplémentaires ont débuté le 9 novembre 2015 sur les échantillons SC5-18 (prélevé à 205,8 m) et SC6-17 (prélevé à 199,0 m). Le retard de démarrage de ces deux essais tient au délai de construction de deux nouvelles cellules œdométriques par Géoressources.

Les analyses minéralogiques de ces cinq échantillons sont présentées dans le tableau suivant.

Echantillons	SC4-7		SC4-20		SC5-18		SC6-17		SC7-16		
	Avant	Après	Avant	Après	Avant	Après	Avant	Après	Avant	Après	
Profondeurs (m)	9,65-9,80		14,80-15,00		25,95-26,10		20,00-20,10		44,5-44,70		
Cote (m NGF)	210,65		205,5		204,05		205,8		199		
Zone saturée/ non saturée	non saturée		saturée		saturée		saturée		saturée		
Composition minéralogique (%)	Illite	6,8		6,9		7,0		3,0		5,4	
	Smectites	9,1		2,1		10,0		2,0		7,5	
	Chlorite	0,1		2,0				2,0		0,8	
	Gypse	4,9		31,0		19,0		7,0			
	Bassanite*	30,0				33,0		78,0		15,0	
	Anhydrite	25,0		0,9		18,0				46,9	
	Dolomite	15,0		8,1		4,0		1,0		1,7	
	Calcite			12,0							
	Magnésite			19,4		6,0		3,0		14,0	
	Quartz	5,9		15,0		3,0		4,0		8,7	
	Orthoclase	3,2									
Albite			2,6								
Potentiel de Gonflement	G = 1,4MPa		G non déterminabl en attente		G = en cours		G = en cours		G = 1,5MPa		

Tableau 11 – Résultats des analyses minéralogiques des échantillons soumis aux essais œdométriques (à compléter à la fin des essais)

Les photographies des échantillons avant essais sont fournies en Figure 41.

La composition minéralogique n'est pas visible à l'œil nu, le choix des échantillons s'est donc effectué « à l'aveugle » de ce point de vue. Ils ont été sélectionnés pour leur cohésion, sachant qu'une éprouvette ne peut être carottée si l'échantillon se délite. Il en ressort malheureusement que l'échantillon SC4-20 ne contient pas (ou extrêmement peu) de minéraux sulfatés gonflants. Il contient du gypse à 31 % et de l'anhydrite à 0,9 %. La bassanite y est absente. Les autres échantillons contiennent des évaporites gonflantes en quantités intéressantes pour les essais, plus ou moins réparties entre l'anhydrite, la bassanite et le gypse.

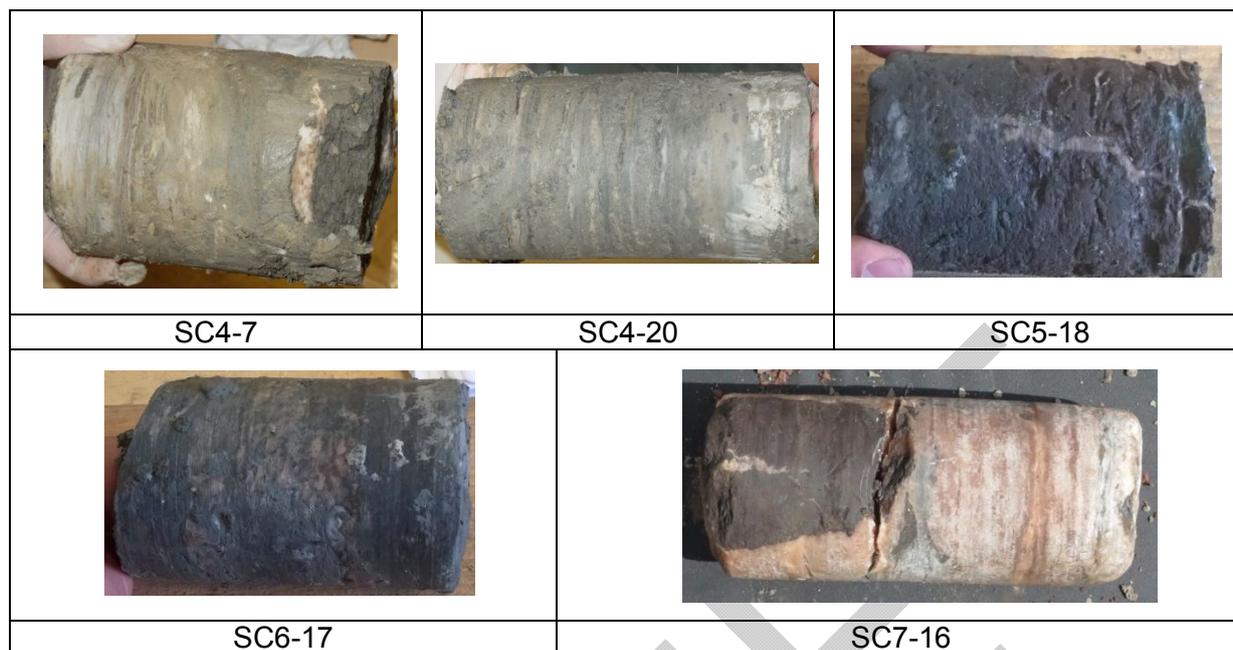


Figure 41 – Photographies des échantillons soumis aux essais œdométriques (avant essais)

Les échantillons ont été soumis à la contrainte qui s'exerçait sur eux dans le sous-sol, du fait du poids des terrains sus-jacents. Dans un premier temps, un tassement a été observé, provenant du fait que les échantillons, soumis à cette contrainte, reprenaient leur volume initial. Après un délai, un gonflement a été observé sur certains échantillons. Le détail est fourni ci-dessous (cf. Rapport de Géoressources en Annexe 13).

- SC4-7

Après une période d'environ 42 jours de retrait, l'échantillon SC4-7 (Figure 42) a présenté une phase de gonflement (0,092 mm au total) qui s'est amortie vers le 90^{ème} jour. En effet, Géoressources a pu observer une stabilité du déplacement mesuré. Au 125^{ème} jour (un peu plus de 4 mois), une contrainte de 1,40 MPa a dû être exercée pour que l'échantillon ait repris son volume initial. Il s'agit du potentiel de gonflement.

Le gonflement observé est équivalent à 0,46 % du volume initial.

Des analyses minéralogiques ont été demandées le 26 janvier 2015.

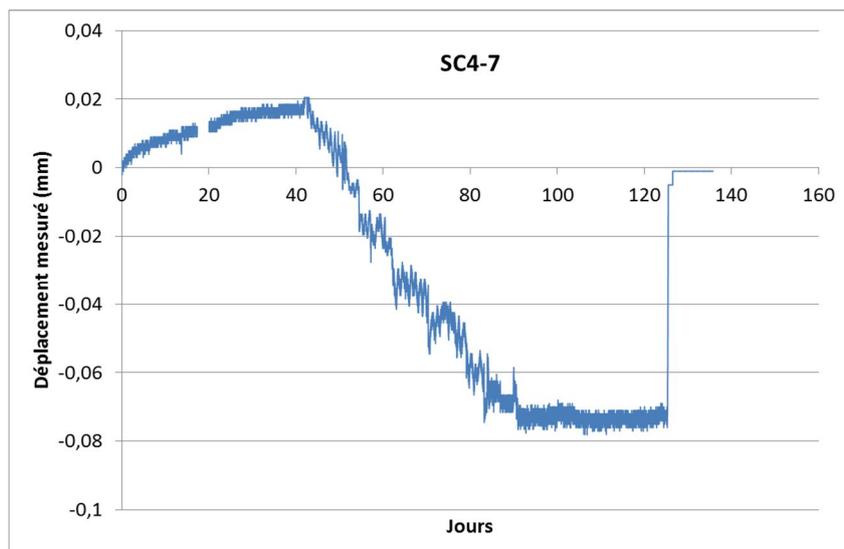


Figure 42 – Evolution du déplacement mesuré en fonction du temps – SC4-7 (pression injection : 0,10 MPa, et pression de confinement : 0,33 MPa)

- SC4-20

Pour l'échantillon SC4-20 (Figure 43), qui ne contient quasiment que du gypse, et 2 % d'argiles gonflantes, Géoressources a pu observer un début de gonflement après 42 jours de retrait, cependant ce gonflement s'est arrêté très rapidement et depuis les mesures de déplacement étant stables, il n'est plus possible d'y associer de retrait ou de gonflement. Le déplacement a depuis été ramené à zéro. Il semble au vu de ces résultats que les smectites seules à hauteur de quelques % ne soient pas responsables d'un gonflement significatif.

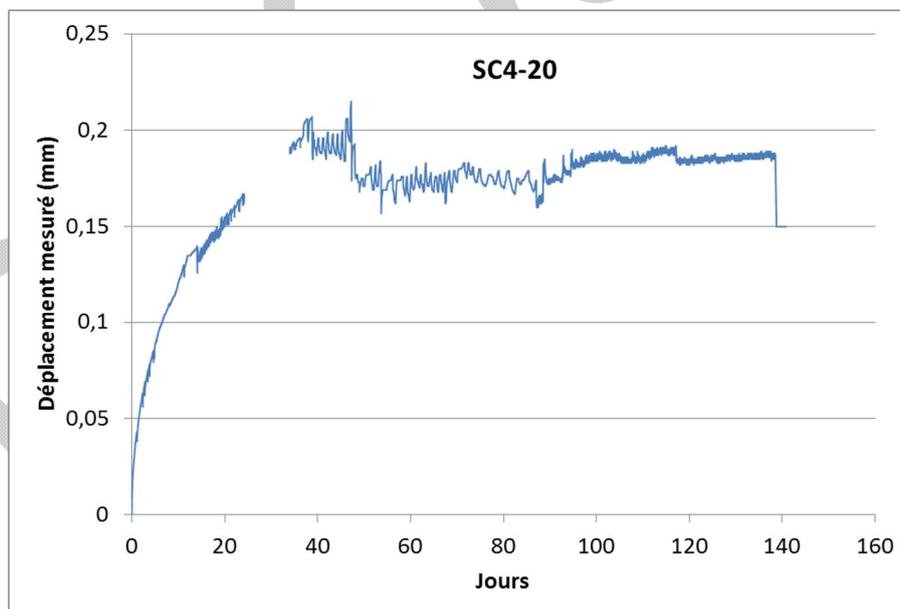


Figure 43 – Evolution du déplacement mesuré en fonction du temps – SC4-20 (pression injection : 0,16 MPa, et pression de confinement : 0,52 MPa)

- SC7-16

Pour l'échantillon SC7-16 (Figure 44), les déplacements mesurés sont très peu importants. Des oscillations de quelques microns seulement sont enregistrées. Nous sommes par conséquent à la limite de détection par rapport à la sensibilité des capteurs de déplacement.

Néanmoins, à partir du 80^{ème} jour, une tendance à un gonflement qui reste peu marquée s'est amorcée. En effet, un déplacement de -17 microns a été enregistré sur une période de 20 jours environ. Cette tendance semble s'amortir. Au 132^{ème} jour (4 mois et demi après le début de l'essai), une contrainte de 1,50 MPa a dû être exercée pour que l'échantillon ait repris son volume initial. Il s'agit du potentiel de gonflement.

Le gonflement observé est équivalent à 0,13 % du volume initial.

Des analyses minéralogiques ont été demandées le 26 janvier 2015.

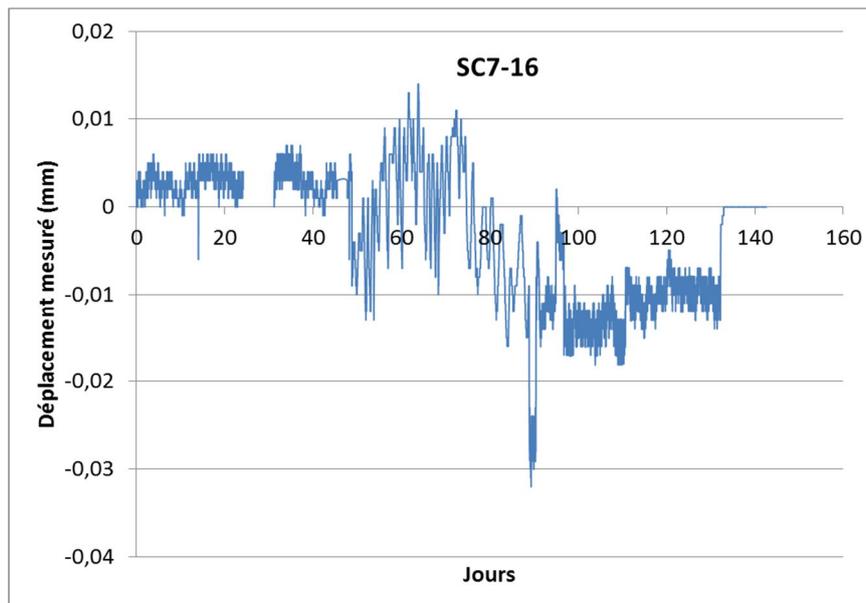


Figure 44 – Evolution du déplacement mesuré en fonction du temps – SC7-16 (pression injection : 0,45 MPa, et pression de confinement : 1,50 MPa)

- SC5-18

Depuis la mise en place de l'échantillon SC5-18 (Figure 45) soit depuis un peu plus de 60 jours, un déplacement d'environ 0,038 mm est mesuré. Actuellement l'essai se poursuit. Les analyses minéralogiques nous permettent d'envisager ce gonflement par une transformation de la bassanite (teneur de 33%) et de l'anhydrite (teneur de 18%) en gypse.

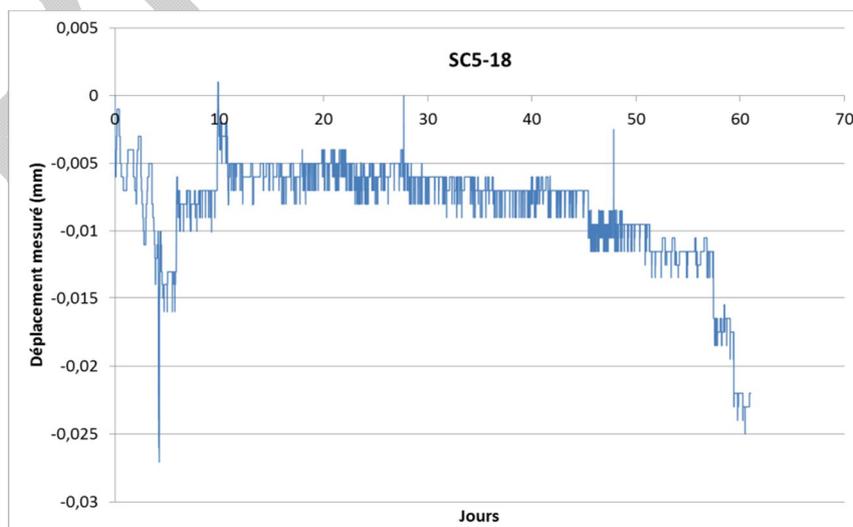


Figure 45 – Evolution du déplacement mesuré en fonction du temps – SC5-18 (pression injection : 0,25 MPa, et pression de confinement : 0,90 MPa)

- SC6-17

Pour l'échantillon SC6-17 (Figure 46), un déplacement négatif a été observé dès la mise en place de l'essai. Cette phase précoce de gonflement est peu probable : Géoressources a attribué ce comportement à une phase d'équilibre de l'échantillon dans la cellule c'est-à-dire à une reprise des jeux mécaniques lors du montage de la cellule œdométrique. Etant donné la teneur en bassanite (78%), un gonflement pourra probablement être mesuré.

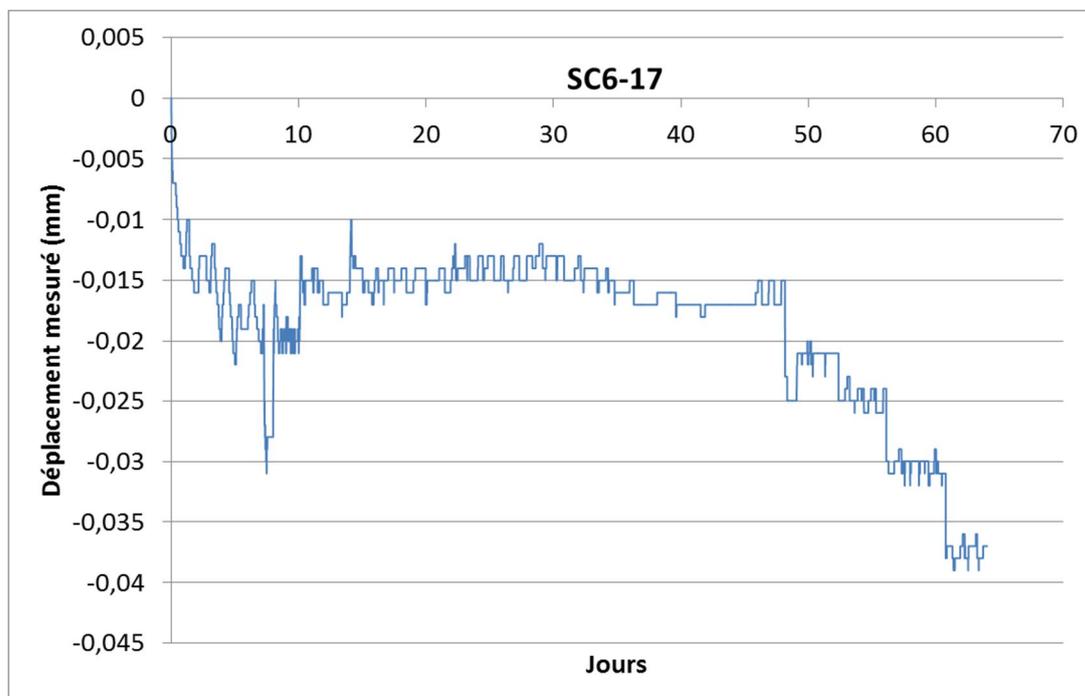


Figure 46 – Evolution du déplacement mesuré en fonction du temps – SC6-17 (pression injection : 0,18 MPa, et pression de confinement : 0,70 MPa)

4.4.2.3 Interprétation des essais de gonflement

Au moment de la rédaction de ce rapport d'avancement, un point téléphonique a été fait avec le laboratoire Géoressources, quant à l'interprétation possible des essais œdométriques. Les essais sont terminés sur SC4-7, SC4-20 et SC7-16. Les échantillons SC4-7 et SC7-16 ont montré un gonflement, de faible amplitude (respectivement 0,46 % et 0,13 %), alors qu'ils auraient pu théoriquement gonfler de 31 % pour le premier (en admettant un gonflement de 62 % pour l'anhydrite, et de 52 % pour la bassanite), et de 36 % pour le second. Ces % ont été calculés d'après les résultats obtenus par Azam [15] décrits au § 3.2.2.3.

Ce dernier précise que, du fait du confinement important et de la rigidité de l'anneau œdométrique, le potentiel de gonflement mesuré dans un œdomètre conventionnel est seulement de 15 % de la valeur théorique de 62 % pour l'anhydrite, estimé sur les volumes molaires et pour un système ouvert qui permet des entrées-sorties libres des eaux pendant l'hydratation. Il ajoute que les valeurs obtenues permettent toutefois de bonnes comparaisons entre les différents matériaux testés. En se basant sur un potentiel de gonflement de 15 % des 62 % théoriques de gonflement de l'anhydrite, et de 15 % des 52 % de gonflement de la bassanite, d'après les essais d'Azam [15], l'échantillon SC4-7 aurait dû gonfler de 4,6 %, soit dix fois plus que ce qui a été obtenu par Géoressources. Il est donc probable que la précipitation du gypse en périphérie de l'échantillon ait cimenté la porosité de l'échantillon, empêchant la circulation de l'eau en son sein et bloquant ainsi le gonflement et donc le déplacement axial. La personne en charge des essais à Géoressources estime

qu'il reste encore une partie d'anhydrite et de bassanite résiduelles, non hydratées. Cela sera vérifié par des analyses minéralogiques par DRX sur la totalité de l'échantillon une fois broyé, qui ont été commandées le 26 janvier 2016 par nos soins.

Il est possible que, connaissant cette part de minéraux restant à gonfler, nous puissions extrapoler les résultats des essais, et obtenir une valeur de gonflement théorique, qui aurait pu être observé si la totalité de l'échantillon avait été soumise à des circulations d'eaux et si l'entièreté de la part volumique d'anhydrite et de bassanite avait été transformée en gypse. La cinétique de ces réactions pourrait également être extrapolée, sachant que 0,46 % de gonflement a été observé en 48 jours. Il s'agira bien d'entendu d'évaluations approximatives, la circulation des eaux étant soumise aux caractéristiques de perméabilités horizontales et verticales de l'échantillon testé.

Quoi qu'il en soit, les potentiels de gonflement mesurés par Géoressources (1,50 MPa pour SC7-16 et 1,40 MPa pour SC4-7) entrent quasiment dans la gamme des pressions de gonflement connues pour l'anhydrite. Celle est comprise entre 1,7 et 4,7 MPa.

L'article de Sass et Burbaum [31] fournit un graphique présentant les domaines de gonflement de l'anhydrite dans un sous-sol, au regard de la contrainte exercée par les terrains de recouvrement. Ce graphique, adapté au cas de Staufen, est issu de trois articles de Steiner [32] [33] et [34].

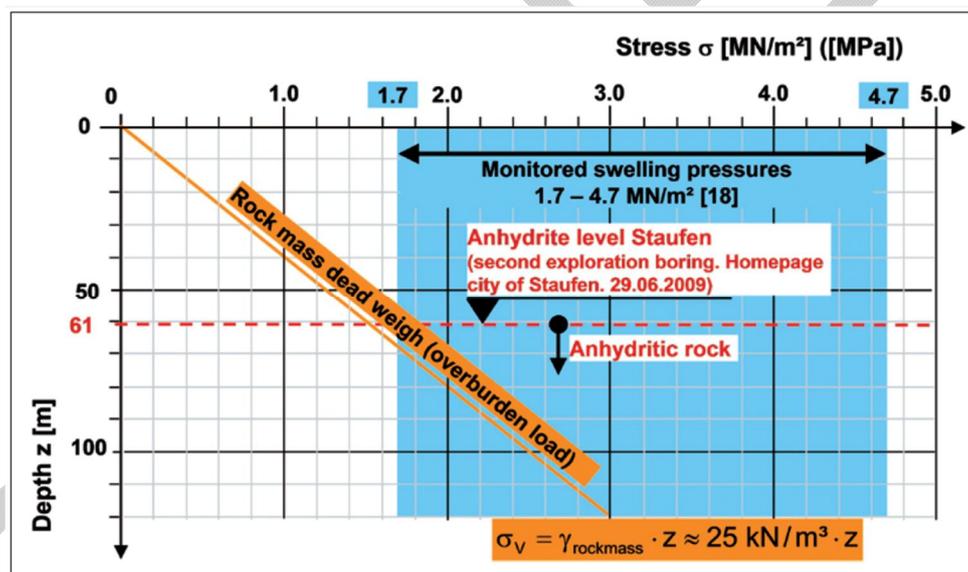


Figure 47 – Pression de gonflement et contrainte exercée par les terrains de recouvrement [31], d'après [32], [33], [34]

Dans le cas de Lochwiller, le gonflement, reconnu entre 202-203 m et 211 m NGF *grosso modo*, est profond au maximum de 9 m au droit de la maison Schorr, et de 35 m environ au droit de la maison Amman. D'après ce graphique, la contrainte verticale exercée par les terrains de recouvrement est comprise approximativement entre 0,2 et 1 MPa. La pression de gonflement de l'anhydrite mesurée est donc supérieure au poids des terrains (jusqu'à au moins 50 m de profondeur), autorisant ainsi la surrection des sols.

5 SYNTHÈSE ET INTERPRÉTATION DES INFORMATIONS ACQUISES

5.1 Synthèse des observations et des analyses géologiques, minéralogiques, hydrogéologiques et chimiques

La figure proposée à la page suivante (Figure 48) synthétise les observations établies sur l'aspect et de la couleur des argilites et des marnes, sur les pourcentages d'évaporites et leur nature prédominante, et sur la présence de fractures en fonction de la profondeur. Les niveaux d'eau observés en octobre 2015 ont été ajoutés, ainsi que les niveaux supposés en cours de gonflement.

- Hypothèse d'une zone altérée

Il a été observé plus haut, au § 4.2.2.6, qu'une zone altérée semblait être présente sous la surface. Elle est matérialisée sur la Figure 48 par une trame de points. Elle se situe entre la surface et une profondeur comprise entre 209-212 m NGF pour les forages SC4 à SC6.

Effectivement, sous la surface, les terrains apparaissent composés de marnes et d'argiles sans litage apparent, de couleurs différentes, souvent bariolées. Il est apparu par ailleurs que les bancs riches en minéraux sulfatés (20-40 %) rencontrés dans le forage SC7 ne contenaient plus que quelques % d'évaporites dans le forage SC4 à quelques mètres sous la surface (en partant de l'hypothèse que la corrélation des bancs est juste). Des eaux superficielles auraient donc circulé dans les premiers mètres sous la surface, auraient hydraté l'anhydrite en gypse, et dissous enfin ce gypse jusqu'à le rendre quasi-absent, sous la forme de poudre blanche ou de petits granules roses. La nature anhydritique des granules analysés sur SC5, SC6 et SC7 conduit à pencher pour une autre hypothèse, qui consiste à penser que l'anhydrite aurait été dissoute par les circulations superficielles, mais que les solutions sulfatées auraient migré plus loin (précipitant éventuellement le gypse plus loin), ne laissant que des granules et de la poudre d'anhydrite.

Cette zone altérée, mentionnée dans la littérature comme « *weathered Keuper* » ou « *leached Keuper* », se trouve actuellement non saturée, c'est-à-dire au-dessus de la nappe actuelle, ceci pour les quatre forages. De ceci, il a été déduit plus haut qu'un premier aquifère avait donc dû se développer, avant la construction du lotissement, et certainement bien avant l'existence du village de Lochwiller, durant le Quaternaire, dans les premiers mètres sous la surface, par l'infiltration des eaux météoriques. La pente de la colline drainait certainement ce ruissellement hypodermique vers le pied de versant, puis vers le ruisseau Dachsgaben qui s'écoule dans la vallée. Il a été noté que les eaux de ce ruisseau présentaient des composantes sulfatées et calciques importantes, laissant penser qu'il constitue l'exutoire de circulations souterraines dans des formations évaporitiques en cours d'évolution minéralogique et/ou dissolution.

Concernant le pied de versant, c'est-à-dire la rue de l'Étang, où se localisent les habitations Salins, Matjeka, Schorr, entre autres, une zone altérée apparaît également, jusqu'à 7-8 m de profondeur au droit de l'habitation Matjeka. Cette zone altérée est toujours le siège d'un aquifère développé au sein du Keuper, capté par les puits privés situés en pied de versant.

- Reconstitution de l'historique des désordres

Nous pensons que la zone intègre (inférieure à 211,8 m NGF au droit de SC4, qui est situé à quelques mètres du forage géothermique), située sous la zone altérée, était intacte du point de vue minéralogique jusqu'au milieu des années 2000, et qu'elle a été perturbée par les arrivées d'eaux d'origine profonde issues du forage géothermique. Les eaux souterraines du Muschelkalk, d'après les informations obtenues, seraient remontées jusqu'à une profondeur de 11,6 m le lendemain de la foration soit une altitude de 208,9 m NGF⁶. Une autre mesure fait état d'un niveau d'eau à -9 m en juin 2008 (rapport BRGM de 2008 [35]), lors des tentatives de rebouchage du forage géothermique, soit une altitude de 211,5 m NGF. Il n'est pas certain qu'il s'agisse bien d'une charge hydraulique représentative de celle d'un aquifère, toutefois c'est probable, ce qui expliquerait l'inondation provoquée au pied de la grande de la propriété Schorr (la cote des terrains se trouve autour de 211,3 m NGF).

Les eaux remontées par le forage géothermique seraient venues circuler dans la zone intègre du Keuper sous la cote 208,9 m NGF, imprégnant les terrains qui constituaient la base de l'aquifère « historique » développé entre 211,8 m NGF et la surface du sol. Les bancs d'anhydrite situés en proximité immédiate du forage géothermique se sont alors mis à gonfler, *a priori* entre 208,9 m NGF (niveau d'eau du Muschelkalk captif) et 202-203 m NGF, base estimée de l'aquifère « actuel ». Des déstructurations des terrains sont apparues suite au gonflement, par apparition de fractures, de décollements des lamines d'argiles et d'anhydrite, favorisant ainsi des circulations d'eaux de plus en plus importantes, au fur et à mesure que le front de gonflement s'étendait sur tout le pourtour du forage. Comme cela avait été supposé dans l'avis rendu en 2014 [20], le pendage géologique des couches (nord-nord-est) a pu orienter le front de gonflement de manière préférentielle dans cette direction. Toutefois, un autre scénario est plus probable. Le gonflement initié dans la tranche 202-203 m / 208,9 m a généré des désordres en sub-surface et en surface, après quelques mois ou plutôt quelques années. Ce délai, à notre avis, provient du fait de la faible conductivité hydraulique des terrains préalablement secs, et de la cinétique de la réaction de gonflement de l'anhydrite⁷. Ces désordres ont compris des ruptures de canalisations répétées, réparées par la mairie à plusieurs reprises. Un réseau d'évacuation des eaux pluviales est présent à quelques mètres du forage géothermique. A proximité de la maison Kandel, il comprend un bassin d'orages profond de 5,20 m. Nous pensons que l'épicentre du gonflement est situé au droit du réseau d'eau, du fait que celui-ci s'est rompu et a apporté, dans ce second temps, davantage d'eaux que le forage géothermique déclencheur du sinistre⁸. Nous concluons que le réseau n'est pas responsable du déclenchement du sinistre, comme cela a été supposé par plusieurs experts, tout simplement parce que la profondeur du bassin d'orage (5,20 m à côté de la maison Kandel soit environ 215,3 m NGF) n'atteint pas la base de la zone altérée, qui se situe à 208,9 m NGF près de la maison Kandel, et à 208,45 m NGF dans le forage SC5, entre la maison Sutter-Brechenmacher et la maison Borowiak-Cromer. Les anhydrites de la zone intègre, sans le forage géothermique, n'auraient pas pu être mises en contact avec de l'eau. Sept mètres d'argiles les sépare du réseau pluvial.

L'aquifère se serait donc déplacé en profondeur, reproduisant le processus décrit ci-dessus d'hydratation de l'anhydrite en gypse, via la phase intermédiaire méta-stable identifiée par les analyses, la bassanite.

⁶ Les altitudes du sol n'étant pas constantes dans le temps, nous avons retenu la cote fournie par Plume en 2013 pour Pz1 [21] : 220,5 m NGF.

⁷ Il sera vu plus loin au § 4.4.2 que les essais en laboratoire ont fourni un gonflement de seulement 0,46 % en 4 mois (à la place des 31 % attendus, calculés sur la composition minéralogique de l'échantillon SC4-7).

⁸ Cela a parfaitement été montré par les calculs du BRGM-DPSM

▪ Description géologique et minéralogique des terrains situés sous la zone altérée

Sous l'épaisseur de terrains altérés, l'aspect des bancs change très rapidement et devient radicalement différent. D'argiles et de marnes non litées, massives, les terrains deviennent assez brutalement finement lités, à fines lamines blanches, de nature sulfatée, qui représentent une part volumique de 10 à 40 % globalement, selon les niveaux. Les couleurs des bancs se corrélaient difficilement, surtout lorsque les marnes sont bariolées. Ainsi, le paramètre couleur n'a pas permis de s'y fier pour établir les corrélations entre les forages.

Il est possible, afin de recalibrer la série sédimentaire et de corréler les bancs entre eux, de suivre un banc épais de 70-80 cm environ, composé d'argilites d'aspect bréchique, qui comporte des vides de fracturation importants comblés par des minéraux sulfatés d'aspect saccharoïde rose sur SC5, et plutôt orangés translucides sur SC6 et SC7. Ce banc particulier s'observe uniquement sur les forages SC5, SC6 et SC7⁹, et forme un plan orienté précisément comme le pendage géologique calculé d'après la corrélation des diagraphies gamma-ray. Il semble donc que cette sorte de brèche intra-formationnelle soit continue à l'intérieur des couches sédimentaires, et que l'on puisse s'y fier pour les corrélations des bancs. Les analyses minéralogiques montrent que sur SC5, la nature du remplissage est gypseux (83 % de gypse, 1 % d'anhydrite), et sur SC6 et SC7 sa nature est plutôt anhydritique à composante bassanitique (75 % d'anhydrite, 11 % de bassanite sur SC6, et 47 % d'anhydrite, 15 % de bassanite sur SC7). Si la corrélation proposée est juste, une transformation des minéraux apparaît de manière évidente.

Ce banc serait présent vers 212,0-212,5 m NGF dans SC4, soit vers 9 m de profondeur. L'observation des carottes montre que l'argile semble beaucoup moins compacte à ce niveau (cf. Photos des carottes en Annexe 6). Il a très certainement été dissous par les circulations d'eau dans la zone altérée, et pourrait être responsable, peut-être en partie seulement, des pertes de fluides de forages et de coulis qui ont été observées au cours du rebouchage du forage géothermique, et au cours de la foration de SC4. Si on le prolonge vers l'ouest, on note qu'il recoupe la surface du sol au pied de la grange Schorr (voir Figure 50 page 82). Cela irait dans le sens d'une circulation hydraulique via les vides laissés par ce niveau dissous, circulation responsable des venues d'eau observées en 2008, trois semaines après la foration.

Dans la zone non altérée, en-dessous de ce banc particulier, sont observées des marnes souvent feuilletées à lamines sulfatées gris foncé. Au-dessus de ce banc repère, les marnes sont grises à gris-vert, puis, en remontant encore vers la surface, elles sont plutôt bariolées (se reporter à la Figure 48 page 72). Ces observations sont en accord avec les descriptions de Rashid [1] (cf. § 3.3.1.3), qui montrait qu'au sein d'une même séquence de dépôt, dans les Marnes irisées inférieures de Lorraine, se rencontraient, du bas vers le haut :

1. des argilites noires à gris sombre, stratifiées par des fines lamines anhydritiques ayant précipité dans un milieu immergé réducteur ;
2. puis des argilites gris-vert, plus ou moins bien stratifiées ou même massives, constituant un faciès intermédiaire, déposé dans des eaux moins réductrices et moins concentrées que les argilites sombres, et dans un environnement moins profond. Elles ne comportent plus de lamines d'anhydrite mais plutôt des nodules, ou de l'anhydrite en imprégnation ;
3. des argilites rouges ou bariolées qui doivent leur couleur à la présence d'hématite. Ces dépôts doivent être exposés à l'air obligatoirement, pour conserver leur couleur

⁹ Cotes du banc bréchique : **SC5** : 206,5-207,2 m NGF, **SC6** : 200,0-200,8 m NGF, **SC7** : 198,6-199,25 m NGF

rouge. Ces dépôts contiennent également de l'anhydrite. Cette phase d'émergence s'accompagne de déformations des structures, fissurations, diagenèses diverses, dissolution, érosion, etc.

Les fractures verticales à sub-verticales observées à Lochwiller, et contenant un remplissage gypseux, se rencontrent plutôt dans les argilites gris foncé et gris-vert, sauf sur le forage SC7, où elles sont extrêmement denses dans les marnes grises, et grises à rouges situées respectivement juste au-dessus et au-dessous du banc repère à minéraux roses.

D'un point de vue minéralogique, les lamines et les nodules de minéraux sulfatés sont de nature plutôt gypseuse à bassanitique à proximité immédiate du forage géothermique, ce qui indique que les transformations minéralogiques sont relativement avancées : le gypse et la bassanite sont en effet plutôt majoritaires, sous le niveau de la nappe actuelle, entre 14 et 23 m de profondeur. L'anhydrite est minoritaire. Le gonflement, au vu des informations minéralogiques et relatives aux teneurs en eau, semble se produire sur la tranche 198-209 m NGF, soit entre 11 et 22 m de profondeur. Au-delà de 22-23 m de profondeur, la bassanite et l'anhydrite sont majoritaires, et les terrains sont plus secs mais la teneur en eau vers 40 m est tout de même de 9,8 %, ce qui n'exclut pas complètement que des arrivées d'eaux du forage géothermique ait également initié un gonflement.

Au droit de l'épicentre du gonflement, les transformations minéralogiques paraissent très avancées également, juste au-dessus et au-dessous du niveau de l'eau (2 m au-dessus, 3 m au-dessous), avec quasiment uniquement du gypse en présence. Plus en profondeur, à partir de 5 m sous la nappe, l'anhydrite reste encore relativement présente (18, 52 et 13% sur les trois échantillons), ainsi que la bassanite sur l'un des échantillons seulement (33 % sur SC5-18). La teneur en eau étant faible (4,2 %) à 9 m sous la nappe, et les transformations minéralogiques peu avancées, il est probable que l'aquifère ne concerne pas cette tranche profonde, et que le gonflement découle de la présence d'eau plus haut, soit compris dans la tranche 203-211 m NGF. Cela correspond à peu près aux observations établies sur le forage SC4 en termes d'altitude.

En aval pendage de l'épicentre, au droit des forages SC6 et SC6-2, la tranche humide qui comprend l'aquifère et où des transformations minéralogiques apparaissent au vu de la présence largement majoritaire de bassanite, est située entre 203 et 209 m NGF. C'est dans cette tranche que le gonflement s'est initié. Plus bas, l'anhydrite est majoritaire, et les terrains sont plus secs, ce qui semble montrer l'absence de circulations d'eaux dans ces niveaux et l'absence de transformations minéralogiques. L'absence de gypse (sauf 7 % sur l'échantillon SC6-17 à 20 m) sur l'ensemble des échantillons analysés sur la colonne sédimentaire indique que les transformations sont moins avancées qu'au droit des forages SC4 et SC5.

Enfin, en dehors du périmètre supposé du gonflement, au droit du forage SC7, les lamines de minéraux sulfatés sont constitués essentiellement de bassanite, et en moindre proportion d'anhydrite. Il est difficile de savoir si ce secteur est en cours d'évolution. Il semblerait que ce ne soit pas le cas, au vu des teneurs en eau qui sont faibles dans ces niveaux rocheux, toutefois, la réalimentation aisée du piézomètre lors du pompage indique tout de même des circulations d'eau, mais certainement à la faveur de fractures, qui sont nombreuses en profondeur. La diagraphie de température a par ailleurs montré un très léger réchauffement de l'eau entre 201 et 205 m, qui pourrait montrer un début de propagation du gonflement vers l'est au droit du verger.

La nature des argiles est la suivante. Les analyses ont montré la présence de smectites, d'illite et de chlorite. Il est apparu, concernant la part de chaque argile au sein de la phase argileuse, que les smectites sont majoritaires. Ce sont des argiles gonflantes, cela a été décrit au § 3.1. Elles représentent environ 50 % de la phase argileuse. En seconde position

vient l'illite, sur un quart à un tiers du volume de la phase argileuse. De la chlorite apparaît enfin, sur 10 ou 20 % du total de cette phase. La répartition de chaque argile au sein de la phase argileuse ne semble pas évoluer entre la zone intègre et la zone altérée, la transformation des couches de sub-surface ne semble avoir concerné que l'anhydrite et le gypse.

Ensuite, du quartz est observé sur l'ensemble des échantillons analysés, à des proportions comprises entre 0,1 % et 46 %, et en moyenne de 5 à 20 %. Aucun faciès sableux ou gréseux n'ayant été observé sur les carottes, il s'avère que le quartz constitue la fraction silteuse présente dans les argilites.

Par ailleurs, deux feldspaths apparaissent dans quelques résultats analytiques : l'orthoclase (ou orthose) (de l'ordre de 4-7% sur de rares échantillons), et l'albite (de l'ordre de 1-2% sur quelques échantillons). Ils sont d'origine détritique, comme les silts.

Les carbonates présents sont la dolomite, la calcite et la magnésite, sur l'ensemble des échantillons, dans des proportions très variables. Ils présentent une très fine granulométrie, et sont liés aux phases argileuses pour composer les marnes, qui sont donc plus ou moins calcaires, dolomitiques ou à tendance magnésienne. Ces carbonates donnent aux terrains des caractères plus massifs, ayant moins tendance au délitement que les terrains plus argileux. La part des carbonates est relativement faible en zone intègre (10-20 % généralement), et plus importante en zone altérée (40-60 % généralement), certainement du fait de la disparition des évaporites.

- Recalage de la série sédimentaire

L'observation du Zellenkalk dans le forage SC7 à 230,7 m NGF permet de fixer la limite entre les Couches à pseudomorphoses de sel, présentes en-dessous de ce niveau particulier, et les Marnes irisées inférieures, au-dessus de ce niveau. L'épaisseur des Marnes à pseudomorphoses de sel est annoncée dans la notice de la carte géologique comme atteignant de l'ordre de 80 mètres. Un simple calcul géométrique basé sur le pendage géologique calculé plus haut permet ainsi de localiser la base du Keuper à 150,7 m NGF au droit du forage SC7, et à 164,0 m NGF au droit du forage SC4, soit à 56 m de profondeur environ (Figure 49). La Lettenkohle n'aurait donc pas été atteinte par le forage SC4 (43,4 m de profondeur).

Deux hypothèses peuvent être avancées pour corréliser les descriptions géologiques faites par l'entreprise en charge du forage géothermique, qui indiquait pour celui-ci des marnes et des calcaires durs gris de 18 à 58 m, puis des calcaires durs, gris, puis blancs de 58 à 140 m [35] :

1. la base du Keuper est recoupée par le forage géothermique à 58 m (en accord avec notre calcul à 2 m près), l'ensemble 18-58 m décrit par le foreur correspond bien à un ensemble homogène daté du Keuper (non altéré), et dans ce cas, à partir de 58 m débute la Lettenkohle (calcaires gris du foreur, pouvant correspondre à la Dolomie inférieure, l'alternance d'argiles silteuses et de bancs dolomitiques de la Lettenkohle moyenne, et à la Dolomie-limite), puis vient le Muschelkalk (calcaires blancs du foreur, la profondeur du passage de gris à blanc n'étant pas fournie) environ 22-28 m plus bas (selon la notice de la carte géologique). Dans ce cas, la venue d'eau rencontrée à 64 m peut être issue d'une fracture ouverte au sein de la Lettenkohle, cet ensemble n'étant pas réputé aquifère.
2. si l'on considère une épaisseur un peu plus faible pour les Couches à pseudomorphoses, par exemple 70 m, la base du Keuper serait plutôt à 46 m au

droit du forage géothermique et aurait presque été atteinte par le forage SC4. La Lettenkohle aurait donc été incluse dans la description de l'ensemble des dépôts compris entre 18 et 58 m, et présenterait une épaisseur plus faible que ce qui est annoncé dans la notice de la carte géologique, plutôt 12 m que 22-28 m. Le Muschelkalk débiterait ensuite à 58 m, hypothèse qui avait été retenue jusqu'à présent par différents rapports, dont celui de GEODERIS [20].

Nous penchons plutôt pour la première hypothèse.

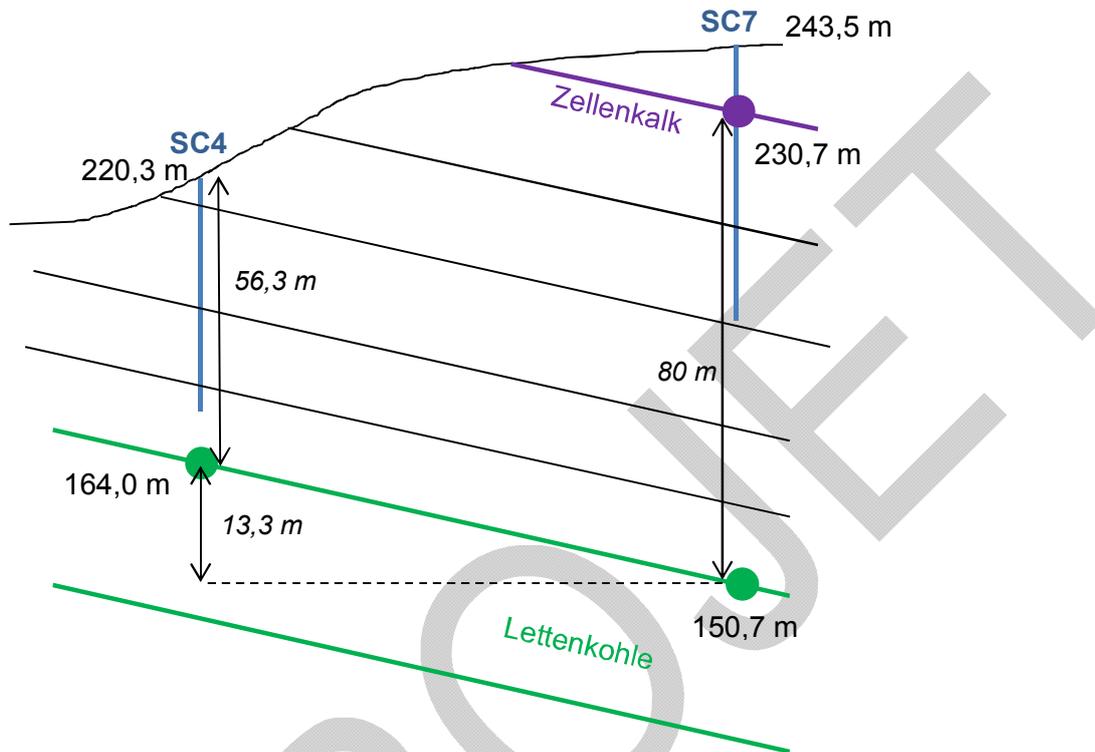


Figure 49 – Représentation schématique du calcul de positionnement de la Lettenkohle

- Hydrogéologie

Il apparaît clairement que le niveau d'eau dans le forage SC7 est beaucoup plus élevé en altitude (223 m NGF) que dans les autres ouvrages (autour de 209 m NGF). Il s'agit d'un niveau aquifère à caractère captif, le haut de la crépine se trouvant à une altitude plus faible de 13 m que celle du niveau d'eau. Il est probable que ce niveau aquifère soit connecté à la nappe qui s'est développée au droit du lotissement Weingarten autour de 209 m NGF. Les trois autres forages le captent à cette altitude. Toutefois le confinement sous une forte épaisseur de terrains par des couches imperméables lui a donné un caractère captif. Il s'agirait d'un aquifère qui s'est développé dans les marnes et argilites du Keuper, probablement suite à leur déstructuration évolutive consécutive au gonflement de l'anhydrite. Il a été vu plus haut que l'aquifère, qui était certainement peu productif, auparavant localisé sous la surface dans la zone altérée, était en quelque sorte « descendu ».

Les trois puits privés captent également le Keuper, toutefois il semble s'agir d'une zone altérée qui serait présente en pied de versant, jusqu'à 7-8 m de profondeur (203,5 m NGF), d'après les carottes réalisés par FONDASOL en 2011 et 2013 dans le cadre de l'expertise judiciaire. Dans le puits communal, l'eau se situe autour de 210 m NGF. Dans les deux autres puits privés, elle se stabilise autour de 208,4 m NGF.

Une esquisse de carte piézométrique a été proposée pour octobre 2015. Il a été choisi de connecter les niveaux d'eau des puits privés situés en pied de versant avec ceux mesurés dans les forages au droit de la colline. Il est difficile de savoir s'il s'agit bien d'un seul et même aquifère, ou si les deux secteurs sont déconnectés, et jusqu'où. Il sera vu plus loin que les eaux souterraines du coteau alimentent le puits Schorr, lui conférant un faciès hydrogéochimique différent de celui des autres puits.

Concernant les puits privés, un écoulement vers le sud-ouest, puis vers l'ouest au niveau de la maison Schorr a été proposé. Concernant le secteur de la colline, une interprétation en termes de « dôme piézométrique » atteignant environ 208,9 m NGF a été envisagée. Ce dôme mettrait en évidence la zone de gonflement, là où les eaux issues de la pluviométrie sont ainsi susceptibles de s'infiltrer plus facilement. Il a été vu plus avant (§ 4.2.3.3) que le gonflement semble se localiser dans la tranche 203-209 m NGF au droit des forages SC4, SC5 et SC6/6-2. C'est probablement dans cette tranche, que l'aquifère actuel situé au droit du lotissement s'est développé. En conséquence, l'esquisse piézométrique propose un dôme piézométrique centré sur le lotissement, peut-être alimenté au nord-ouest par les eaux du secteur du puits communal dont la charge hydraulique est plus élevée, ce dôme alimentant par ailleurs au sud-est le secteur du puits Schorr. Le caractère plus dilué des eaux du forage SC6-2 irait dans le sens d'une alimentation par un apport extérieur.

Les difficultés rencontrées pour purger les piézomètres SC4 et SC6-2, et au contraire l'excellente réalimentation des piézomètres SC5 et SC7, témoignent de circulations d'eaux localisées, très probablement à la faveur de fractures ou de niveaux sédimentaires rendus perméables, suite à des dissolutions de minéraux sulfatés.

- Température et conductivité des eaux souterraines

Des diagraphies de température et de conductivité électrique des eaux souterraines ont été effectuées en septembre 2015. Il est rappelé que la transformation de l'anhydrite en gypse est un phénomène exothermique, c'est-à-dire qu'il dégage de la chaleur, qui peut être détectée dans les eaux.

Les eaux du forage SC7, situé en théorie en dehors de la zone impactée par les transformations minéralogiques, présentent des températures relativement stables avec la profondeur, comprises entre 11,5 et 11, 8 °C avec les valeurs les plus élevées se situant autour de 201-205 m NGF. Sur cet intervalle d'altitude, la bassanite est très largement majoritaire sur l'anhydrite, et le gypse est quasiment absent. Cela pourrait signifier un léger phénomène de transformations minéralogiques de l'anhydrite en bassanite, en cours. L'anhydrite est beaucoup plus présente au-dessus et au-dessous de ces altitudes. La conductivité électrique des eaux est stable de 209,5 (haut de la crépine) à 203,5 m NGF, puis croît régulièrement, jusqu'à atteindre des valeurs caractéristiques d'eaux extrêmement minéralisées (> 23 mS/cm). Un phénomène de stratification des eaux par densités, donc par salinités, croissantes, a dû se produire dans la partie inférieure de la crépine, si la conductivité hydraulique est très faible et que les eaux circulent très lentement. Il serait donc possible d'envisager des vitesses de circulation plus importantes au-dessus de 203 m NGF, ce qui correspond *grosso modo* à la portion d'aquifère où les eaux sont légèrement plus chaudes. Cela appuierait l'hypothèse de phénomènes de transformations d'anhydrite en cours. Les températures relevées dans les forages SC4 et SC5, bien supérieures et atteignant presque 15°C (voir plus bas), conduisent à qualifier ce phénomène de très modéré dans ce secteur du forage SC7.

Les mesures réalisées à l'intérieur de la crépine du piézomètre SC6-2 montrent une température légèrement plus élevée qu'à l'intérieur du SC7. En effet, on mesure 12,1°C en surface de l'eau à 209,2 m NGF, la température diminue ensuite à 11,9 °C autour de 208 m NGF, puis remonte continuellement jusqu'à la mesure la plus profonde, située à

203,2 m NGF, jusqu'à atteindre 12,3°C. Les eaux sont également beaucoup plus conductrices en profondeur. Après avoir stagné autour de 1 mS/cm entre 209 et 206 m, elles atteignent en fond de forage 6 mS/cm, puis amorcent une redescente à 5,6 mS/cm vers 203 m NGF. L'interprétation proposée pour ces mesures est la suivante : les transformations d'anhydrite en gypse seraient déjà présentes à 209 m NGF, la température de l'eau étant d'emblée plus élevée que dans SC7. Plus en profondeur, la température et la conductivité électrique croissantes indiqueraient un degré de transformations plus important, et ceci dans la tranche 203-206 m NGF. Ces hypothèses sont cohérentes avec celle d'un gonflement situé sur la tranche 203-209 m pour SC6, basé sur la présence quasi unique de bassanite sur ce niveau, et sur la présence très majoritaire d'anhydrite sous la cote 200 m NGF.

Les mesures effectuées sur les eaux du piézomètre SC5 fournissent des résultats très particuliers du point de vue de la température. Celle-ci est beaucoup plus élevée que sur SC6-2 et SC7, puisque comprise entre 12,4°C et 14,8°C. Les valeurs les plus fortes se rencontrent entre 208 et 209 m NGF, on note une décroissance de 14,8°C à quasiment 209 m, jusqu'à 12,5°C à 207,8 m. Les valeurs les plus faibles se rencontrent ensuite jusqu'à 206 m, et c'est sur cet intervalle de profondeur que la conductivité commence à augmenter. Sous 206 m, la température remonte jusqu'à 13,7°C à 204,5 m. La conductivité continue à augmenter également, jusqu'à 6 mS/cm environ. Comme soupçonné à l'examen des analyses minéralogiques, cette tranche de terrain apparaît comme concernée par le gonflement, en particulier entre 204,5 et 205,5 m NGF, et 208 et 209 m NGF.

Sur les eaux du piézomètre SC4, enfin, la température est très élevée, au regard des températures relevées sur SC7 et SC6-2, et dans la même gamme que les températures relevées sur SC5, à l'épicentre du gonflement. Elles débutent à 14,2°C à 208,8 m NGF, puis diminuent constamment vers la profondeur, jusqu'à 13°C à 201,5 m NGF. Conjointement à cette baisse de température, la conductivité hydraulique des eaux augmente également, par sauts, passant de 2,9 à 16,9 mS/cm, traduisant la présence d'eaux très minéralisées en fond de forage. Les températures des eaux sur toute la hauteur crépinée semblent mettre en évidence la présence d'un phénomène d'hydratation de l'anhydrite sur toute la tranche de terrains (201,5 – 209 m NGF). En effet, les températures sont toujours plus élevées que sur le forage témoin théorique d'une zone non impactée SC7, même si l'on peut soupçonner sur cet ouvrage un début d'amorce du phénomène. Les analyses minéralogiques et les teneurs en eau conduisaient à soupçonner un gonflement entre 202 et 209 m, les interprétations sont donc cohérentes entre elles.

- Hydrochimie

L'examen des résultats des analyses d'eaux indiquent tout d'abord que la conductivité électrique des eaux des piézomètres se trouve très supérieure (2260 à 7610 $\mu\text{S/cm}$) à celle des puits privés (1240 à 1950 $\mu\text{S/cm}$), même si cette dernière se trouve dans une gamme assez élevée. Les puits privés captent l'eau présente dans la zone altérée du Keuper, et non une nappe alluviale, ce qui explique cette minéralisation. Au droit du lotissement, la conductivité électrique des eaux du forage SC4 est très supérieure à celle des autres forages (SC4 : 7610 $\mu\text{S/cm}$, SC5 : 4170 $\mu\text{S/cm}$, SC6 : 2260 $\mu\text{S/cm}$, SC7 : 3210 $\mu\text{S/cm}$), lui conférant ainsi une particularité, qui sera également mise en évidence sur les analyses chimiques.

Ensuite, il ressort de manière évidente que le contexte géochimique des différentes composantes de l'hydrosystème est hétérogène spatialement. Globalement les faciès affichés par les eaux sont à tendance chlorurée et sulfatée, calcique et magnésienne, en particulier pour les piézomètres, le puits Schorr et le ruisseau. La richesse des eaux en sulfates et en calcium provient du contact avec l'anhydrite et le gypse, ces minéraux sont solubles et en cours de transformations minéralogiques. Le piézomètre SC4 présente les concentrations les plus élevées en calcium (526 mg/l), magnésium (244 mg/l), sodium

(984 mg/l), potassium (42,2 mg/l), chlorures (999 mg/l) et sulfates (2580 mg/l). Les eaux du forage SC5 présentent le même faciès que celles du forage SC4, toutefois plus diluées, notamment en sodium (293 mg/l) et potassium (22,8 mg/l), en chlorures (266 mg/l) et en sulfates (2000 mg/l). Les eaux des forages SC6-2 et SC7 apparaissent dans les mêmes gammes de concentrations en calcium et magnésium, mais dans des gammes moins concentrées en sodium et potassium, et en chlorures. Les eaux du forage SC6 contiennent moins de calcium (327 mg/l) et de sulfates (923 mg/l) que celles de SC7 (503 mg/l et 1840 mg/l respectivement), probablement du fait d'un apport d'eaux moins minéralisées issues du pied de versant (secteur du puits communal) et de la « jeunesse » relative de l'aquifère au regard du retard du début de gonflement.

Le puits Schorr semble subir une influence des eaux souterraines du coteau, le faciès de ses eaux étant celui qui se rapproche le plus des eaux des piézomètres, du point de vue du calcium (323 mg/l), du magnésium (88 mg/l), et des sulfates (808 mg/l). Cela indique un mélange avec des eaux issues de l'aquifère développé au droit de la colline. Cela appuie la carte piézométrique proposée. La carte montre en effet une circulation des eaux du secteur Kandel vers le puits Schorr. Le puits communal et le puits Matjeka se détachent nettement des autres ouvrages cités, montrant un faciès davantage carbonaté/bicarbonaté plutôt que sulfaté. Le puits Matjeka présente les concentrations les plus faibles en calcium (81 mg/l), en magnésium (35 mg/l), et en sulfates (51 mg/l), de même que le puits communal. En revanche, leurs teneurs en sodium, potassium, nitrates et chlorures ne sont pas négligeables, ce qui pourrait traduire une influence du salage de la chaussée en hiver (sodium et chlorures) et de l'utilisation d'engrais dans les jardins potagers proches (nitrates et potassium).

Il apparaît donc que les eaux des quatre forages sont riches en sulfates et en calcium, ces éléments minéraux étant issus de la dissolution des évaporites présentes aux mêmes niveaux que les crépines des piézomètres. Les forages SC4 et dans une moindre mesure SC5, présentent une composante supplémentaire chlorurée, sodique et potassique. Pour les chlorures et le sodium, il semble qu'ils proviennent d'un mélange avec des eaux plus profondes, remontées du Muschelkalk captif via le forage géothermique fuyard. Les teneurs en potassium sont plus difficiles à interpréter, cet élément étant largement présent dans les engrais et pouvant être apporté par les eaux superficielles. La teneur en nitrates des eaux du SC4, très faible au regard de celles des autres ouvrages, l'individualise également, et semble mettre en évidence l'origine plutôt souterraine des eaux, au regard d'une composante plus superficielle des autres eaux, les nitrates ayant pour origine les engrais utilisés en agriculture. L'absence de nitrates sur SC4 va dans le sens d'une origine profonde du potassium présent dans ses eaux.

- Datation des eaux

L'analyse des gaz dissous (CFC et SF6) sur les eaux de SC4 donne des résultats plutôt caractéristiques d'un mélange d'eaux anciennes (30-40 ans, selon teneurs en CFC) et d'eaux plus récentes (la teneur en SF6 indique une concentration caractéristique de 2010). Il n'est pas possible de connaître plus précisément l'origine des eaux « anciennes » : Muschelkalk captif ou eaux du Keuper infiltrées plus en amont, sur la colline.

Les analyses effectuées sur les eaux du forage SC5 fournissent des âges non cohérents, autour de 35-40 ans, mais avec du CFC12 en excès. Il s'agirait selon le laboratoire d'un mélange complexe d'eaux d'âges différents.

Sur les eaux du forage SC6-2, les âges obtenus sont d'environ 35 ans, si l'on considère un modèle piston. Si l'on considère un modèle binaire, ce qui est plus probable, le laboratoire l'interprète comme un mélange de 20-40 % d'eau récente, avec une eau infiltrée il y a 40-45 ans. Cette dernière pourrait être issue du forage géothermique, toutefois les analyses

chimiques n'indiquent pas un faciès à tendance chlorurée-sodique comme sur les eaux de SC4. Il pourrait s'agir plutôt de circulations lentes issues de l'infiltration plus haut sur la colline, qui se produisent au sein du Keuper (secteur SC7 et plus haut). Cela est confirmé par les résultats sur les eaux du piézomètre SC7, qui indiquent des eaux plus anciennes que les précédentes, 40-45 ans pour un modèle piston, > 200 ans pour un modèle à recharge continue, et dans le cas d'un modèle binaire, il s'agirait d'une eau de 40 ans ou plus mélangée 10-20 % d'eau récente.

Les résultats sur le puits Schorr indiquent un âge d'environ 40 ans, sauf pour le SF6 qui indique une infiltration vers 2005. Il s'agirait selon le laboratoire d'un mélange complexe d'eaux d'âge différent.

Enfin, les analyses effectuées sur les eaux du puits communal ne sont pas interprétables.

- Synthèse des informations géologiques et hydrogéologiques obtenues, à l'échelle

Les deux figures ci-dessous constituent des coupes géologiques et hydrogéologiques. Elles présentent l'agencement dans l'espace de la zone altérée et de la zone intègre, des couches de minéralogies différentes, des niveaux d'eau dans le Keuper, de l'intensité du gonflement et de ses limites supposées (attention à l'exagération verticale de 2x).

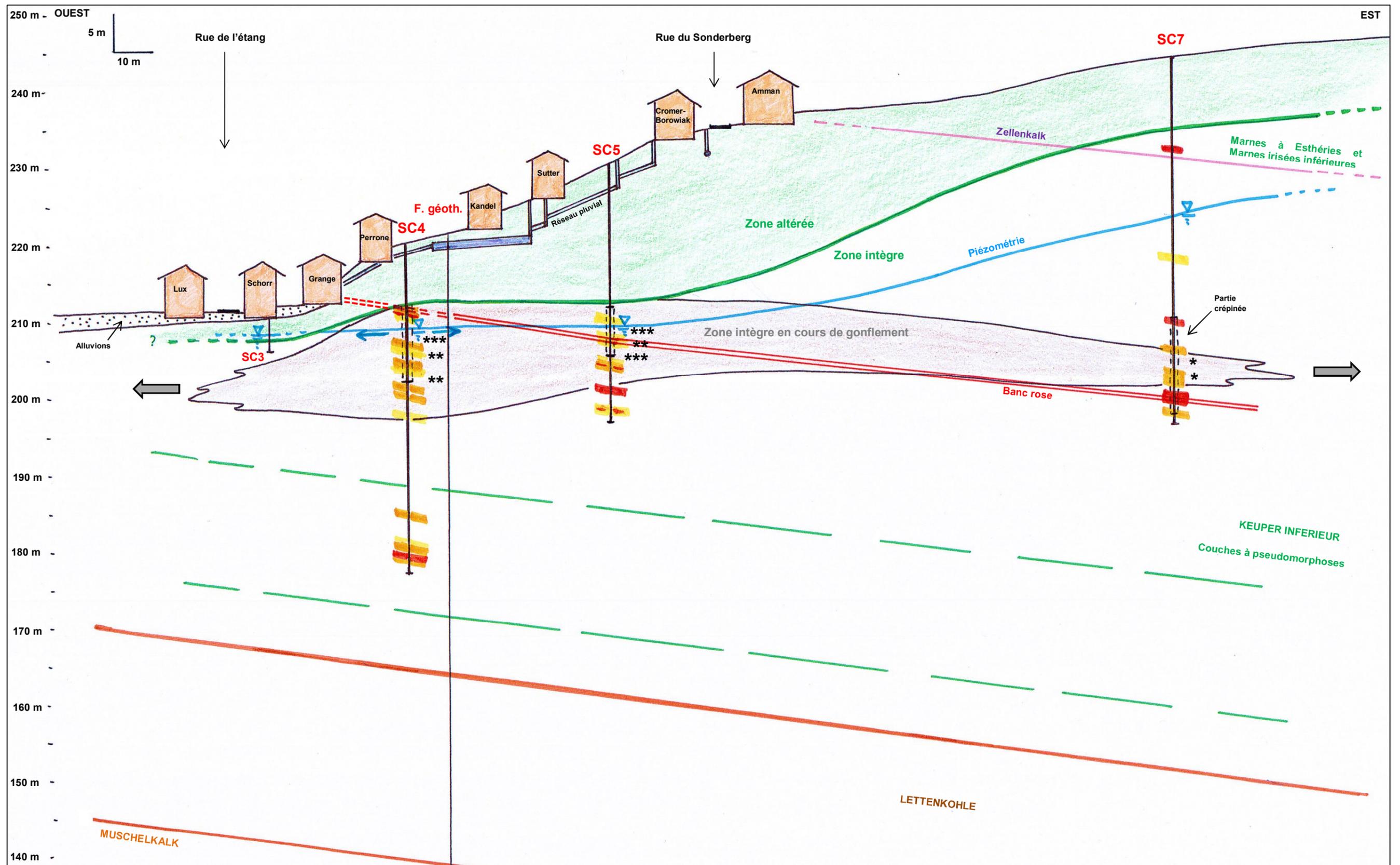


Figure 50 – Coupe géologique et hydrogéologique ouest-est - Extension supposée du gonflement et de la zone altérée
 (bancs jaunes : gypse, oranges : bassanite, rouges : anhydrite, *** : intensité du gonflement d'après mesures de température de l'eau)

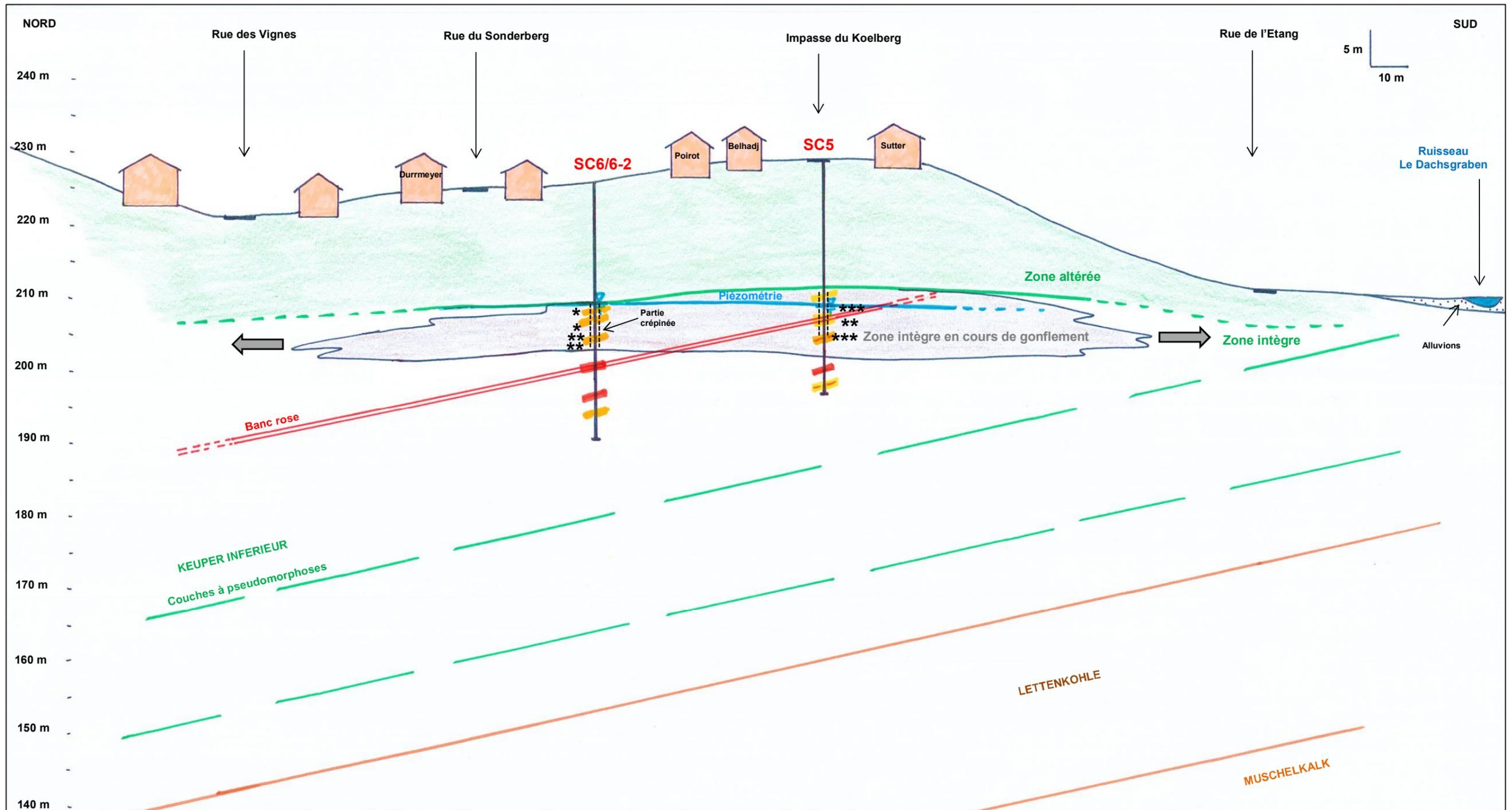


Figure 51 – Coupe géologique et hydrogéologique nord-sud - Extension supposée du gonflement et de la zone altérée (bancs jaunes : gypse, oranges : bassanite, rouges : anhydrite, *** : intensité du gonflement d'après mesures de température de l'eau)

5.2 Synthèse des informations géotechniques

Les indices de plasticité calculés à l'aide des limites d'Atterberg indiquent des terrains faiblement à moyennement plastiques. Les indices de consistance, quant à eux, montrent des terrains très consistants. Reportés sur le diagramme de Casagrande, modifié par Dakshanamurthy et Raman, les sols de Lochwiller, du point de vue de leurs composants argileux uniquement (les minéraux sulfatés ne sont pas pris en considération), sont classifiés dans les limons peu plastiques, avec un potentiel de gonflement moyen.

Les valeurs de bleu indiquent par ailleurs des sols limoneux peu plastiques à moyennement plastiques. La sensibilité des sols au retrait-gonflement des terrains d'après [30] serait faible à moyenne.

Ces informations sont obtenues à l'aide de moyens semi-empiriques, c'est pourquoi des essais de gonflement, fournissant des quantifications plus précises, ont été demandés.

Le comportement gonflant par hydratation (d'anhydrite et/ou d'argiles) des sols et des roches peut être testé en laboratoire par des essais de gonflement, encore appelés essais œdométriques. Ils consistent en l'introduction d'un échantillon rocheux sélectionné et taillé sous forme cylindrique dans un œdomètre. Il s'agit d'une cellule qui permet uniquement la déformation axiale. La contrainte axiale exercée sur l'échantillon correspond à celle appliquée sur les roches testées par les terrains de recouvrement. Une pression interstitielle est maintenue stable tout au long de l'essai, à l'aide de deux injecteurs, situés aux deux extrémités de l'éprouvette. Le fluide injecté est de l'eau recueillie sur site.

Le déplacement axial, provoqué par le gonflement, est mesuré, jusqu'à atteindre une valeur stable signifiant l'arrêt du phénomène. Une contrainte supplémentaire est alors appliquée à l'échantillon jusqu'à lui faire retrouver son volume initial avant gonflement. Il s'agit du potentiel de gonflement, exprimé en MPa. Des analyses minéralogiques sont prévues avant et après gonflement sur chaque échantillon.

Cinq échantillons ont été testés : deux sur SC4, le premier prélevé au-dessus et le second prélevé en dessous de la surface de la nappe, un sur SC5, un sur SC6, et un sur SC7. Les analyses minéralogiques ont montré la présence d'anhydrite et/ou de bassanite sur 4 échantillons parmi les 5, celui prélevé sur SC4 sous la nappe ne contient que du gypse. Il n'est en effet pas possible de distinguer à l'œil nu les différents minéraux, et le prélèvement s'est fait à « l'aveugle ».

Sur l'autre échantillon prélevé sur le forage SC4 (SC4-7), le gonflement a duré 48 jours, et s'élève à 0,46 % du volume initial. Cette valeur est faible au regard du gonflement théorique calculé à partir de sa composition, qui est de 31 %. La littérature mentionne que les essais œdométriques ne parviennent à faire gonfler que 15 % du potentiel théorique des échantillons, du fait du confinement dans l'œdomètre. Toutefois, l'échantillon aurait dû gonfler davantage, et nous supposons que la précipitation du gypse en périphérie de l'échantillon a cimenté la porosité de l'échantillon, empêchant la circulation de l'eau en son sein et bloquant ainsi le gonflement et donc le déplacement axial. La personne en charge des essais à Géoressources estime qu'il reste encore une partie d'anhydrite et de bassanite résiduelles, non hydratées. Cela sera vérifié par des analyses minéralogiques par DRX sur la totalité de l'échantillon une fois broyé, qui ont été commandées le 26 janvier 2016.

Il est possible que, connaissant la part de minéraux restant à gonfler, nous puissions extrapoler les résultats des essais, et obtenir une valeur de gonflement théorique, qui aurait pu être observé si la totalité de l'échantillon avait été soumis à des circulations d'eaux et si l'entièreté de la part volumique d'anhydrite et de bassanite avait été transformée en gypse. La cinétique de ces réactions pourrait également être extrapolée, sachant que 0,46 % de

gonflement a été observé en 48 jours. Il s'agira bien d'entendu d'évaluations approximatives, la circulation des eaux étant soumise aux caractéristiques de perméabilités horizontales et verticales de l'échantillon testé.

Quoi qu'il en soit, les potentiels de gonflement mesurés par Géoressources (1,50 MPa pour SC7-16 et 1,40 MPa pour SC4-7) entrent quasiment dans la gamme des pressions de gonflement connues pour l'anhydrite. Celle est comprise entre 1,7 et 4,7 MPa.

L'article de Sass et Burbaum [31] fournit un graphique présentant les domaines de gonflement de l'anhydrite dans un sous-sol, au regard de la contrainte exercée par les terrains de recouvrement. Dans le cas de Lochwiller, le gonflement, reconnu entre 202-203 m et 211 m NGF *grosso modo*, est profond au maximum de 9 m au droit de la maison Schorr, et de 35 m environ au droit de la maison Amman. D'après ce graphique, la contrainte verticale exercée par les terrains de recouvrement est comprise approximativement entre 0,2 et 1 MPa. La pression de gonflement de l'anhydrite mesurée est donc supérieure au poids des terrains, autorisant ainsi la surrection des sols.

L'échantillon SC4-20, qui ne contient que du gypse, n'a pas gonflé significativement. Les échantillons prélevés sur SC5 et SC6, démarrés plus de deux mois après les trois premiers, sont toujours en situation de gonflement. Les résultats seront fournis dans une seconde version du présent rapport.

5.3 Prévision de poursuite de la surrection des sols

Il a été validé par les essais que le poids des terrains au droit de Lochwiller n'était pas suffisant pour lutter contre la contrainte exercée par le gonflement de l'anhydrite, ce qui provoque la surrection des terrains. Toutefois, à la vue des résultats obtenus, on peut affirmer que les essais en laboratoire ne permettent pas d'appréhender la complexité tridimensionnelle du site en termes de circulations des eaux, répartition des perméabilités, etc. Il a été vu au paragraphe précédent que les résultats très partiels des essais de gonflement, obtenus au jour de la rédaction du présent rapport d'avancement, ne permettaient pas de prédire correctement le gonflement à attendre sur un échantillon de composition minéralogique donnée, ni la cinétique de ce gonflement. En effet, il semble, sur l'échantillon ayant donné les résultats les plus significatifs, que seulement 10 % du gonflement que l'on pourrait attendre d'un essai œdométrique et que seulement 1,5 % du gonflement que l'on s'attendrait à observer en milieu naturel aient été enregistrés.

Nous espérons pouvoir extrapoler les résultats des essais œdométriques après leur achèvement, et réception des analyses minéralogiques finales, en vue d'obtenir une hauteur de gonflement théorique, et une cinétique envisageable.

Ceci étant, même si les informations minéralogiques sont partielles, et non représentatives de la totalité de la hauteur des terrains évaporitiques de Lochwiller, il est possible, en extrapolant, de remarquer que, sur la tranche de terrains qui nous paraît concernée par le gonflement (202-211 m NGF), l'anhydrite et la bassanite sont très minoritaires dans les forages SC4 et SC5. Le gypse est quasiment uniformément présent, ce qui tend à montrer que l'achèvement du gonflement serait proche sur cette tranche de terrains. Il nous semble que les terrains plus profonds sont plus secs, et que le gonflement ne les concerne pas.

En revanche, les échantillons analysés sur les carottes du forage SC6 montrent, toujours sur la tranche de terrains où l'aquifère s'est développé, que la bassanite est quasiment l'unique phase sulfatée présente. Plus en profondeur, de l'anhydrite s'y ajoute. Nous estimons en conséquence que le processus de gonflement est beaucoup moins avancé sur ce secteur, et qu'une amplitude importante de surrection des sols reste à y attendre.

De même sur le forage SC7, la bassanite est majoritaire, suivie de près par l'anhydrite. Les diagraphies de température semblent montrer qu'une amorce de gonflement se situe vers 201-205 m, ce qui est à peu près cohérent avec la profondeur du gonflement observée sur les autres forages. Nous estimons donc que le gonflement commence à se propager en direction de l'est, c'est-à-dire vers la colline, dans une zone que nous pensions non concernée par le phénomène.

Les forages SC4, SC5 et SC6, qui sont plus profonds que les parties qui sont crépinées actuellement, ont vu leur fond rebouché avec le plus grand soin, par du coulis expansif et de la sobranite (argile gonflante en billes). Nous ne pensons pas que le gonflement évoluera en profondeur, il semble bien circonscrit dans la tranche identifiée, et nos forages ne se comporteront pas comme des drains vers la profondeur, du fait de leur rebouchage. De plus, le forage géothermique, qui alimentait en eau les terrains, cela est confirmé par les faciès chimiques des eaux des forages SC4 et SC5, est sur le point d'être rebouché par le BRGM-DPSM stoppant ainsi les arrivées d'eau possibles sur la tranche inférieure à celle identifiée par le gonflement.

Concernant l'extension spatiale du phénomène, nous estimons qu'il est probable qu'il s'étende dans toutes les directions autour du lotissement, étant donné que le pendage des couches à anhydrite est faible, et que les transformations minéralogiques se propagent au sein des bancs. Cela augmente leur perméabilité, favorisant la circulation des eaux, et auto-entretenant le phénomène. La carte géologique montre que la base du Keuper, donc la limite inférieure des couches à anhydrite, se situe bien au-delà du village. En conséquence, il n'est pas possible de prédire un arrêt de la propagation du gonflement, ni, pour le moment, de cartographier des secteurs où l'on serait sûr qu'il restera stable. La profondeur de la zone altérée n'est pas connue au droit du vieux village, en dehors de la propriété Matjeka, où elle est profonde de 7,5 m. Aussi, il pourrait être envisagé, si la zone altérée s'approfondit vers l'ouest, qu'elle arrêtera le gonflement (Figure 52). Seuls des forages pourront fournir une cartographie en trois dimensions de cette zone altérée, et des niveaux d'eaux au sein de la nappe du Keuper.

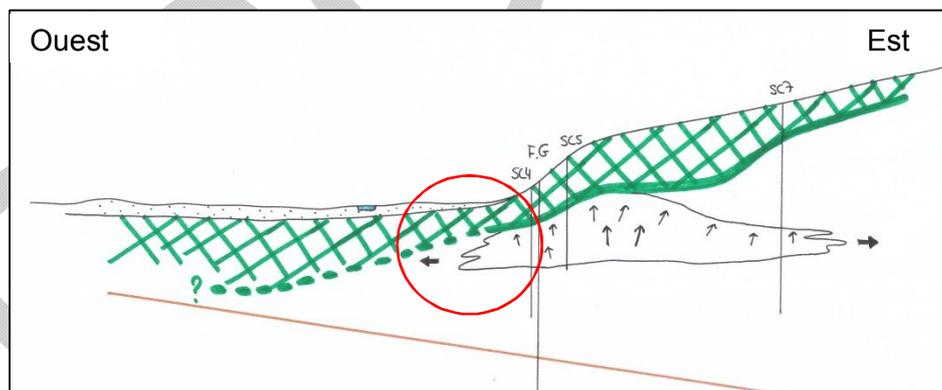


Figure 52 – Schéma de principe de l'arrêt possible du gonflement par la zone altérée si celle-ci est suffisamment profonde (Attention : échelles non respectées)

Une dernière considération est à prendre en compte, et elle n'est pas négligeable. Il s'agit de la dissolution du gypse. Il a été vu plus haut qu'il est très soluble, il se dissout donc facilement, en particulier dans les eaux peu minéralisées. Les eaux pluviales sont peu minéralisées, et il n'est pas impossible qu'en s'infiltrant dans le sous-sol, elles aient déjà commencé à dissoudre le gypse néo-formé. La zone altérée, dans laquelle les transformations minéralogiques se sont certainement étalées au cours du Quaternaire, ne contient quasiment plus d'anhydrite, ni de gypse, cela témoigne de leur dissolution. Il faut donc s'attendre à un tassement des sols de Lochwiller, probablement pendant (ce qui restera invisible si le gonflement le surpasse), mais surtout après la fin du gonflement.

6 CONCLUSION

Le paragraphe 5 synthétise les résultats obtenus par la présente étude.

Les éléments principaux à retenir sont les suivants :

Géologie, minéralogie et transformations des évaporites

- Le pendage des couches est orienté vers le NNE (N111°E, 7°NE).
- La base des couches à évaporites du Keuper se situerait vers 58 m de profondeur, toutefois une incertitude persiste. Elle est profonde au minimum de 43 m.
- Une zone « altérée » est présente sous la surface, et jusqu'à des profondeurs de 8 m dans le secteur du forage géothermique, 19 m au droit de l'épicentre du gonflement, 17 m au nord de l'épicentre, et 10 m plus haut sur la colline, au droit du verger communal. Cette zone a été nommée ainsi du fait que les terrains rencontrés par les forages sont quasiment complètement dépourvus d'évaporites, alors que les mêmes couches, rencontrées plus profondément sur le forage SC7, en contiennent entre 20 et 40 %. La zone altérée contient en moyenne 1,3 % vol. d'évaporites. Cette situation trouve très probablement son origine dans des circulations superficielles d'eaux de pluie au cours du Quaternaire, qui ont gonflé l'anhydrite en la transformant en gypse, et ont redissous le gypse, ne laissant quasiment que des argiles en place. Cette couche constitue l'aquifère que nous avons appelé « historique ».
- La zone « intègre » a été nommée ainsi parce qu'elle n'a pas été altérée historiquement par les circulations de sub-surface. Elle comprend des terrains composés d'une alternance, en fines lamines millimétriques à centimétriques, d'argiles et de marnes, avec des évaporites. Des composantes carbonatées (calcite et dolomite) et silteuses ont été mises en évidence par ailleurs. Les terrains peuvent être humides, sièges d'un aquifère qualifié d' « actuel », et en cours de gonflement, ou beaucoup plus secs en profondeur, *a priori* non concernés par les transformations minéralogiques. La zone intègre contient en moyenne 52,6 % vol. d'évaporites.
- Les évaporites en question se répartissent entre l'anhydrite, la bassanite, qui est une phase semi-hydratée intermédiaire et méta-stable, et le gypse.
- Les argiles sont majoritairement composées de smectites, qui sont des argiles gonflantes, et qui vont donc, en présence d'eau, ajouter du volume à celui occasionné par les transformations de l'anhydrite.
- D'après les analyses minéralogiques, les analyses de teneurs en eau des terrains, et les diagraphies de température, on peut relativement bien circonscrire le gonflement en termes de profondeur : 198-209 m NGF sur SC4 à côté du forage géothermique, 203-211 m NGF sur SC5 à l'épicentre, 203-209 m NGF sur SC6 au nord, et 201-205 m NGF sur SC7 dans le verger communal.
- On remarque en conséquence qu'une amorce de réactions minéralogiques a été mise en évidence dans le secteur du forage SC7, alors qu'il avait été positionné pour obtenir un profil minéralogique de terrains non concernés par le gonflement.
- Le forage SC4 sur la propriété Kandel contient, aux profondeurs identifiées par le gonflement, une majeure partie de gypse et de bassanite. Sur le forage SC5 à l'épicentre, le gypse est très majoritaire. En revanche, les forages SC6 et SC7 contiennent plutôt de la bassanite, et un peu d'anhydrite. Il reste donc à craindre un

gonflement important du côté du forage SC6, et visiblement vers l'est en direction de SC7, où les transformations semblent s'amorcer. Au droit l'épicentre, et dans une moindre mesure au droit de la propriété Kandel, les transformations semblent plutôt sur le point de s'achever.

- Un banc épais de 80 cm est identifiable sur les forages SC5, et SC6 et SC7. Il s'agit d'une sorte de brèche intra-formationnelle très ouverte et à remplissage rose saccharoïde sur SC5, et orange translucide sur SC6 et SC7. Les trois niveaux constituent un plan orienté comme celui calculé comme pendage géologique par les corrélations des diagraphies gamma-ray, il s'agirait donc d'un seul et même banc. Sa nature est gypseuse sur SC5, et anhydritique à faible composante bassanitique sur SC6 et SC7. Corrélé au forage SC4 où il n'est pas observé, il serait présent vers 9 m de profondeur. Il s'agit de la profondeur où l'équipe de Ginger-CEBTP a perdu tout le fluide de forage en forant l'ouvrage SC4 en juillet 2015. Les évaporites sont très certainement dissoutes (la profondeur se situe légèrement sous la base de la zone altérée), et des vides subsistent. Si ce banc est prolongé vers l'ouest, il recoupe la surface du sol dans la partie basse de la grange de la propriété Schorr. Les vides qu'a laissés sa dissolution sont certainement responsables des venues d'eau observées en 2008 suite à la foration du forage (la charge hydraulique mesurée était de 20 cm environ supérieure à la cote de la base de la grange).

Reconstitution de l'historique des désordres

- L'étude semble confirmer que la zone intègre a été perturbée par les arrivées d'eaux d'origine profonde issues du forage géothermique, car le réseau d'écoulement des eaux pluviales, dont le bassin d'orage, profond au plus de 5,2 m, n'atteint pas la base de la zone altérée (211,8 m NGF). Les eaux remontées par le forage géothermique seraient venues circuler dans la zone intègre du Keuper sous la cote 208,9 m NGF, imprégnant les terrains qui constituaient la base de l'aquifère « historique » développé entre 211,8 m NGF et la surface du sol. Les bancs d'anhydrite situés à proximité immédiate du forage géothermique se sont alors mis à gonfler, et ont permis, suite aux déstructurations des bancs consécutives au gonflement, le développement de l'aquifère « actuel » plus bas en altitude que l'aquifère « historique ». Le pendage géologique des couches (nord-nord-est) a pu orienter le front de gonflement de manière préférentielle dans cette direction, vers l'épicentre actuel. Toutefois, nous pensons plutôt que suite aux déstructurations des terrains, lentes dans un premier temps dans les terrains compacts, et de plus en plus rapides, induisant le début de la surrection des sols, les ruptures répétées du réseau pluvial enterré ont apporté dans un second temps, davantage d'eaux que le forage géothermique déclencheur du sinistre. L'épicentre est en conséquence décalé au droit du réseau pluvial. Les anhydrites de la zone intègre, sans le forage géothermique, n'auraient pas pu être mises en contact avec de l'eau. Sept mètres d'argiles et de marnes les sépare du réseau pluvial.

Hydrogéologie

- L'ensemble des forages et des puits privés captent le Keuper, une carte piézométrique a été proposée. Elle montre en pied de versant un écoulement vers le sud-ouest, puis vers l'ouest, entre le puits communal et le puits Schorr. Au droit de la colline, l'aquifère « actuel » est développé dans les couches en cours de gonflement, et montre une sorte de dôme piézométrique généré par les infiltrations pluviales facilitées par la fracturation consécutive au gonflement. Ce dôme serait alimenté au nord-ouest par les eaux du Keuper du pied de versant (secteur du puits communal), et au sud-ouest, alimenterait le secteur du puits Schorr. Cette hypothèse est confirmée par la chimie des eaux (faciès moins concentré sur forage SC6-2) et faciès

sulfaté calcique sur le puits Schorr). Elle confirme le lien de cause à effet entre le forage géothermique et les venues d'eau sur la propriété Schorr en 2008.

- Les difficultés rencontrées pour purger les piézomètres SC4 et SC6-2, et au contraire l'excellente réalimentation des piézomètres SC5 et SC7, témoignent de circulations d'eaux localisées et privilégiées, très probablement à la faveur de fractures ou de niveaux sédimentaires rendus perméables, suite à des dissolutions de minéraux sulfatés.

Localisation du gonflement par la température des eaux souterraines

- La transformation de l'anhydrite en gypse est un phénomène exothermique, c'est-à-dire qu'il dégage de la chaleur, qui peut être détectée dans les eaux par des mesures appropriées.
- Une augmentation de température de 0,3 °C sur les eaux de SC7 entre 201 et 205 m NGF semble mettre en évidence une amorce de gonflement sur ce secteur, pourtant situé à 200 m du forage géothermique. Les températures relevées dans les forages SC4 et SC5, bien supérieures et atteignant presque 15°C, conduisent à qualifier ce phénomène de très modéré dans ce secteur du forage SC7.
- Sur le forage SC6, au nord de l'épicentre, les transformations d'anhydrite en gypse seraient plus intenses dans la tranche 203-206 m NGF (température jusqu'à 12,3°C), ce qui est cohérent avec le gonflement identifié sur la tranche 203-209 m basé sur la minéralogie des évaporites ;
- Les eaux les plus chaudes sont mesurées sur SC4 (entre 13°C et 14,2°C) et SC5 (entre 12,4°C et 14,8°C) dans le cœur du gonflement. Les tranches de terrain qui apparaissent les plus concernées par le gonflement sur SC5 sont situées entre 204,5 et 205,5 m NGF, et 208 et 209 m NGF, cela est cohérent avec le gonflement localisé entre 203 et 211 m NGF par la minéralogie. Sur SC4, les températures des eaux sont élevées de la surface (14,2°C) à la base de la crépine (13°C), ce qui est également cohérent avec le gonflement localisé entre 198 et 209 m NGF par la minéralogie.

Hydrochimie

- Il ressort de manière évidente que le contexte géochimique des différentes composantes de l'hydrosystème est hétérogène spatialement.
- Les eaux des forages sont très minéralisées, avec, par ordre de minéralisation décroissante, SC4, SC5, SC7, puis SC6-2, ensuite puits Schorr. Le puits communal et le puits Matjeka présentent des conductivités plus faibles.
- Les piézomètres et le puits Schorr présente des faciès sulfatés, calciques, et magnésiens. Ces éléments minéraux sont issus de la dissolution des évaporites présentes aux mêmes niveaux que les crépines des piézomètres. Le piézomètre SC4, et le piézomètre SC5 dans une moindre mesure, montrent des eaux avec un faciès chloruré sodique supplémentaire, indiquant une composante d'eaux profondes issues du forage géothermique (l'absence de nitrates sur SC4 semble le confirmer).
- les eaux du piézomètre SC6 sont moins concentrées, certainement du fait d'une dilution par un apport d'eaux issues du nord-ouest (secteur du puits communal).
- les eaux du puits Schorr montrent une composante évidente d'eaux issues de l'aquifère de la colline.

- les données de datation des eaux indiquent sur la plupart des ouvrages des mélanges d'eaux anciennes et récentes, les premières correspondant à celles présentes dans le Keuper et provenant de l'amont hydraulique (colline), voire présentes dans le Muschelkalk, et les secondes de la pluviométrie.

Caractérisation du gonflement

- Les indices de plasticité calculés à l'aide des limites d'Atterberg indiquent des terrains faiblement à moyennement plastiques. Les indices de consistance, quant à eux, montrent des terrains très consistants. Reportés sur le diagramme de Casagrande, modifié, les sols de Lochwiller, du point de vue de leurs composants argileux uniquement (les minéraux sulfatés ne sont pas pris en considération), sont classifiés dans les limons peu plastiques, avec un potentiel de gonflement moyen. Les valeurs de bleu indiquent par ailleurs des sols limoneux peu plastiques à moyennement plastiques. La sensibilité des sols au retrait-gonflement des terrains d'après [30] serait faible à moyenne.
- Le comportement gonflant par hydratation (d'anhydrite et/ou d'argiles) des sols et des roches est en cours d'évaluation en laboratoire par des essais de gonflement, encore appelés essais œdométriques.
- Trois essais ont été lancés en août 2015 et sont terminés (l'un des trois n'a pas donné de résultat concluant du fait de sa nature uniquement gypseuse), deux autres ont débuté en novembre 2015 et sont toujours en cours de gonflement.
- Les deux essais terminés ont très peu gonflé (0,5 %), pendant environ 50 jours, au regard de la quantité d'évaporites qu'ils contenaient (un gonflement de 30 % environ était attendu). Des analyses minéralogiques sont en cours pour comparaison avec l'état initial. Les potentiels de gonflement mesurés sont de 1,4 et 1,5 MPa, ce qui s'approche de la gamme de pressions de gonflement de l'anhydrite (1,7-4 MPa). Il a été validé par les essais que le poids des terrains au droit de Lochwiller n'était pas suffisant pour lutter contre la contrainte exercée par le gonflement de l'anhydrite, ce qui provoque la surrection des terrains.
- Il est possible que, connaissant la part de minéraux restant à gonfler, nous puissions extrapoler les résultats des essais, et obtenir une valeur de gonflement théorique, qui aurait pu être observé si la totalité de l'échantillon avait été soumise à des circulations d'eaux et si l'entièreté de la part volumique d'anhydrite et de bassanite avait été transformée en gypse. La cinétique de ces réactions pourrait également être extrapolée. Il s'agira bien entendu d'évaluations approximatives, la circulation des eaux étant soumise aux caractéristiques de perméabilités horizontales et verticales de l'échantillon testé.

Prévision de poursuite de la surrection des sols

- les essais en laboratoire ne permettent pas à ce jour d'appréhender la complexité tridimensionnelle du site en termes de circulations des eaux, répartition des perméabilités, etc.
- Toutefois, même si les informations minéralogiques sont partielles, il est possible, en extrapolant, de remarquer que, sur la tranche de terrains qui nous paraît concernée par le gonflement (environ 202-211 m NGF), l'anhydrite et la bassanite sont minoritaires dans les forages SC4 et SC5. Le gypse est majoritaire, ce qui tend à montrer que l'achèvement du gonflement serait proche sur cette tranche de terrains.

Il nous semble que les terrains plus profonds sont plus secs, et que le gonflement ne les concerne pas.

- En revanche, les échantillons analysés sur SC6 montrent, toujours sur la tranche de terrains où l'aquifère s'est développé, que la bassanite est quasiment l'unique phase sulfatée présente. Plus en profondeur, de l'anhydrite s'y ajoute. Nous estimons en conséquence que le processus de gonflement est beaucoup moins avancé sur ce secteur, et qu'une amplitude importante de surrection des sols reste à y attendre.
- De même sur le forage SC7, la bassanite est majoritaire, suivie de près par l'anhydrite. Un gonflement s'amorcerait vers 201-205 m, dans une zone que nous pensions non concernée par le phénomène.
- Le forage géothermique, qui alimentait en eau les terrains, cela est confirmé par les faciès chimiques des eaux des forages SC4 et SC5, est sur le point d'être rebouché par le BRGM-DPSM. Cela va stopper les arrivées d'eau possibles sur la tranche inférieure à celle identifiée par le gonflement.
- Concernant l'extension spatiale du phénomène, nous estimons qu'il est probable qu'il s'étende dans toutes les directions car les transformations minéralogiques se propagent au sein des bancs, ce qui augmente leur perméabilité, et favorise donc la circulation des eaux, auto-entretenant le phénomène. La carte géologique montre que la base du Keuper, donc la limite inférieure des couches à anhydrite, se situe bien au-delà du village, vers l'ouest. En conséquence, il n'est pas possible de prédire un arrêt de la propagation du gonflement, ni, pour le moment, de cartographier des secteurs où l'on serait sûr qu'il restera exempt de désordres. La profondeur de la zone altérée n'est pas connue au droit du vieux village, en dehors de la propriété Matjeka, où elle est profonde de 7,5 m. Ainsi, il pourrait être envisagé, si la zone saturée s'approfondit vers l'ouest, qu'elle arrêtera le gonflement. Seuls des forages pourront fournir une cartographie en trois dimensions de cette zone altérée, et des niveaux d'eaux au sein de la nappe du Keuper.
- Une dernière considération est à prendre en compte, et elle n'est pas négligeable. Il s'agit de la dissolution du gypse. Il a été vu plus haut qu'il est très soluble, il se dissout donc facilement, en particulier dans les eaux peu minéralisées. Les eaux pluviales sont peu minéralisées, et il n'est pas impossible qu'en s'infiltrant dans le sous-sol, elles aient déjà commencé à dissoudre le gypse néo-formé. La zone altérée, où les transformations minéralogiques se sont certainement étalées au cours du Quaternaire, ne contient quasiment plus d'anhydrite, ni de gypse, cela témoigne de leur dissolution. Il faut donc s'attendre à un tassement des sols de Lochwiller, probablement pendant (ce qui restera invisible si le gonflement le surpasse), mais surtout après la fin du gonflement.

Poursuite de l'étude

La présente étude a été réalisée à l'aide de mesures, d'observations et d'essais en laboratoire, qui ne se sont pas tous révélés vraiment significatifs, notamment les essais de gonflement. Les hypothèses et les limites des raisonnements proposés ont été décrites précisément dans le déroulement de l'étude. Ces derniers devraient être, sur proposition de notre part, examinés par un collège d'experts, spécialistes des phénomènes de gonflement de l'anhydrite, et des moyens de remédiation connus, et utilisés notamment pour stabiliser les tunnels alpins ou jurassiens. Les experts pourront également se prononcer sur l'extension spatiale future du gonflement.

7 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Rashid H. (1995) – « Contribution à l'étude d'un bassin évaporitique triasique – Les marnes à anhydrite (Marnes irisées inférieures) de Lorraine ». Thèse de doctorat en Géosciences. UFR 181 S.T.M.P. ; GFD Sciences de la Terre. Doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy I.
- [2] <https://fr.wikipedia.org>
- [3] MEDAD (2007) – « Le gonflement-retrait des argiles – Comment prévenir les désordres dans l'habitat individuel ». Version 4 du 06 août 2007.
- [4] Carte et notice géologique de Saverne – 1/50 000 - BRGM N°233, date de parution 1979
- [5] Géochronique (2001) – « Evaporites ». Numéro 80 de décembre 2001.
- [6] Cojan I. et Renard M. (2013) – « Sédimentologie » 3^e édition – Editions DUNOD.
- [7] Kinsman D. J. J., Calcium sulphate minerals of evaporate deposits : their primary mineralogy. Fourth international symposium on salt-northern Ohio Geological Society, 343-348
- [8] Butscher C., Huggenberger P., Zechner E., Einstein H. (2011) – « Relation between hydrogeological setting and swelling potential of clay-sulfate rocks in tunneling ». Engineering Geology 122 (2011) 204–214
- [9] Anagnostou G., Pimentel E., Serafeimidis K., 2010. Swelling of sulphatic claystones – some fundamental questions and their practical relevance. Geomechanics and Tunnelling 3 (2010), No. 5
- [10] Van Driessche A.E.S, Benning L. G., Rodriguez-Blanco J.D., Ossorio M., Bots P., Garcia-Ruiz J.M. (2012) – « The role and implications of bassanite as a stable precursor phase to gypsum precipitation ». Science 336, pp 69-72 (2012) ;
- [11] Fabre D. (2015) – « Géologie et propriétés géotechniques du gypse et de l'anhydrite. Dissolution & gonflement ». Mines et carrières hors-série. Octobre 2015.
- [12] Bekendam R. F., 2000. Subsidence potential of the Hengelo Brine Field (Part I). Physico-Chemical Deterioration and Mechanical Failure of Salt Cavern Roof Layers. Fall 2000 Meeting, San Antonio, Texas, USA
- [13] Technischer Bericht NTB 90-17. Langzeitquellenverhalten von Tongesteinen und tonigen Sulfatgesteinen
- [14] Kovari K., Amstad C., Anagnostou G., 1988. Design/construction methods – Tunnelling in swelling rocks. In Key Questions in Rock Mechanics, Cundall et al. (eds). Balkema
- [15] Azam S. (2003) – « Influence of mineralogy on swelling and consolidation of soils in eastern Saudi Arabia ». Can. Geotech. J. 40: 964–975

- [16] Bultel F. (2001) – « Prise en compte du gonement des terrains dans le dimensionnement des revêtements des tunnels ». Thèse. Engineering Sciences. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées
- [17] Firtion F. (1952) – « Gypse et anhydrite triasiques des environs de Strasbourg ». Compte-rendus de la 19^{ème} session du Congrès Géologique International, Alger. Section XIII, fasc. XIII, p165-170
- [18] Lucas J. (1962) – « La transformation des minéraux argileux dans la sédimentation. Etudes sur les argiles du Trias ». *Mém. Serv. Carte géol. Als.-Lorr.*, n° 23, 202 p., Strasbourg.
- [19] Chapellier D. (non daté) – « Diagraphies aquifères – Cours online de géophysique ». Université de Lausanne – Institut Français du Pétrole.
- [20] Kimmel M. (2014) – « Avis sur l'origine des désordres survenus sur la commune de Lochwiller (67). Rapport GEODERIS E2014/003DE du 9 janvier 2014.
- [21] Rauh F. et Thuro K. (?) – « Investigations of the swelling behaviour of pure anhydrites ». Engineering Geology, Technische Universität München, Germany
- [22] Anagnostou G., Serafeimidis K., Vrakas A. (2015) – « On the Occurrence of Anhydrite in the Sulphatic Claystones of the Gypsum Keuper ». *Rock Mech Rock Eng* (2015) 48:1–13
- [23] Strauss M. (2013) – « Assistance hydrogéologique dans le cadre d'un litige à Lochwiller (67) » Rapport PLUME-ECI n°R13-498.
- [24] Krüger G. - « Lochwiller. Terrain Schorr. Etude géotechnique G5 ». Rapport FONDASOL MS11-0448 du 12/12/2011
- [25] BRUDER J. - « Lochwiller. Lotissement Weingarten et ses abords. Investigations géotechniques et instrumentation. Compte-rendu ». Rapport FONDASOL MS 130096 du 15/05/2013
- [26] Hubert P., Olive P., Ravailleau S. (1996) – « *Estimation pratique de l'âge des eaux souterraines par le tritium* ». *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water science*, vol. 9, n°4, 1996, pp. 523-533.
- [27] Chrétien M. (2010) – « Compréhension des mécanismes de retrait-gonflement des sols argileux : approche sur site expérimental et analyse de sinistres sur constructions individuelles ». Soutenue le 28/05/2010- *Université Bordeaux 1*
- [28] Dakshanamurthy V., Raman V. (1973) – « A simple method of identifying an expansive soil ». *Soils and Foundations*, Japanese Soc. of Soil Mech. and Foundation Eng., vol. 13, n°1, pp. 97-104
- [29] Jahangir E. (2011) – « Phénomènes d'interaction sol-structure vis-à-vis de l'aléa retrait-gonflement pour l'évaluation de la vulnérabilité des ouvrages » THÈSE soutenue le 15/11/2011. Spécialité : Génie Civil – Hydrosystèmes – Géotechnique INPL Nancy
- [30] Chassagneux D., Stieljes L., Mouroux P., Menilliet F, Ducreux G.H. (1996) – « Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols (sécheresse-pluie) à l'échelle

départementale. Approche méthodologique dans les Alpes de Haute-Provence ». *Rapport BRGM n°R39218*, 33 pp.

- [31] Sass I. et Burbaum U. (2010) – « Damage to the historic town of Staufen (Germany) caused by geothermal drillings through anhydrite-bearing formations ». *ACTA CARSOLOGICA* 39/2, 233–245, POSTOJNA 2010
- [32] Steiner, W. (1989) – « *Wisenberg tunnel* » - Sonderdruck aus Tagungsbericht D037 der Fachgruppe für Untertagbau des SIA, 69–80.
- [33] Steiner, W. (1993) – « Swelling Rock in Tunnels: Rock Characterization, Effect of Horizontal Stresses and Construction Procedures ». *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 30, 4, 361–380.
- [34] Steiner, W. (2007) – « Einfluss der Horizontalspannungen auf das Quellverhalten von Gipskeuper ». *Felsbau*, 25,1, 15–22.
- [35] Babot Y., Schomburgk S. - « Expertise des venues d'eau chez Monsieur Schorr, 13 rue de l'étang à Lochwiller (67) ». *Rapport BRGM/ALSNT08N13* de juin 2008.
- [36] Robert A. et Fabre D. (1987) – « Rapport sur le gonflement ». Comité Français de Mécanique des roches. Groupe de travail « rupture en souterrain »

8 LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 - album photographique

Annexe 2 - Fiches de suivi de forage

Annexe 2-A – Suivi de forage SC4

Annexe 2-B – Suivi de forage SC5

Annexe 2-C – Suivi de forage SC6

Annexe 2-D – Suivi de forage SC7

Annexe 3 - Coupes des équipements des forages

Annexe 4 – Feuilles de synthèse gamma-ray, géologie et % d'évaporites

Annexe 4-A – Feuille de synthèse SC4

Annexe 4-B – Feuille de synthèse SC5

Annexe 4-C – Feuille de synthèse SC6

Annexe 4-D – Feuille de synthèse SC7

Annexe 5 – Diagraphies gamma-ray avec corrélations

Annexe 6 – Photographies des carottes

Annexe 6-A – Photographies des carottes de SC4

Annexe 6-B – Photographies des carottes de SC5

Annexe 6-C – Photographies des carottes de SC6

Annexe 6-D – Photographies des carottes de SC7

Annexe 7 - Fiches de résultats d'analyses minéralogiques et géotechniques sur les échantillons rocheux

Annexe 7-A – Fiches échantillons de SC4

Annexe 7-B – Fiches échantillons de SC5

Annexe 7-C – Fiches échantillons de SC6

Annexe 7-D – Fiches échantillons de SC7

Annexe 8 – Répartition des phases sulfatées dans les échantillons rocheux analysés, teneur en eau "naturelle" et degré de saturation de la roche

Annexe 9 - Fiches de prélèvements d'eau

Annexe 10 – Bordereaux analytiques Eurofins

Annexe 11 – Bordereaux analytiques de datation des eaux OSUR Rennes

Annexe 12 - Rapport de chantier de Ginger-CEBTP

Annexe 13 – Analyses minéralogiques – Caractérisation géotechnique – Géoressources