

RAPPORT D'ÉTUDE
DRS-16-160847-11327A

23/03/2017

**Arrêt de l'exploitation de sel de la concession
de Poligny (Jura, 39)**

**Analyse du contexte hydrogéologique, de son
évolution et des mouvements de terrains liés à
l'ancienne exploitation**

Arrêt de l'exploitation de sel de la concession de Poligny (Jura, 39)

Analyse du contexte hydrogéologique, de son évolution et des mouvements de terrains liés à l'ancienne exploitation

Direction des Risques du Sol et du Sous-sol

Liste des personnes ayant participé à l'étude :

Catherine PINON, Ingénieur à l'Unité Risques Géotechniques liés à l'exploitation du Sous-sol

Arnaud CHARMOILLE, Ingénieur de l'unité Eaux Souterraines et Emissions de Gaz

Xavier DAUPLEY, Responsable de l'unité Risques Géotechniques liés à l'exploitation du Sous-sol

Thomas RICHARD, Technicien à l'Unité Risques Géotechniques liés à l'exploitation du Sous-sol

Nicolas PUCHEUX, Ingénieur à l'Unité Expertise en Toxicologie – Ecotoxicologie des Substances chimiques

PREAMBULE

Le présent rapport a été établi sur la base des informations fournies à l'INERIS, des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives et de la réglementation en vigueur.

La responsabilité de l'INERIS ne pourra être engagée si les informations qui lui ont été communiquées sont incomplètes ou erronées.

Les avis, recommandations, préconisations ou équivalent qui seraient portés par l'INERIS dans le cadre des prestations qui lui sont confiées, peuvent aider à la prise de décision. Etant donné la mission qui incombe à l'INERIS de par son décret de création, l'INERIS n'intervient pas dans la prise de décision proprement dite. La responsabilité de l'INERIS ne peut donc se substituer à celle du décideur.

Le destinataire utilisera les résultats inclus dans le présent rapport intégralement ou sinon de manière objective. Son utilisation sous forme d'extraits ou de notes de synthèse sera faite sous la seule et entière responsabilité du destinataire. Il en est de même pour toute modification qui y serait apportée.

L'INERIS dégage toute responsabilité pour chaque utilisation du rapport en dehors de la destination de la prestation.

	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	Arnaud CHARMOILLE et Xavier DAUPLEY	Philippe GOMBERT	Pascal BIGARRE
Qualité	Respectivement Ingénieur à l'unité Eaux Souterraines et Emissions de Gaz et à Responsable de l'unité Risques Géotechniques liés à l'Exploitation du sous-sol	Ingénieur à l'unité Eaux Souterraines et Emissions de Gaz	Directeur des Risques du Sol et du sous-sol
Visa			

Résumé

La société SOLVAY a exploité par dissolution, depuis 1929, la concession de sel de Poligny, appartenant aujourd'hui à la société INOVYN. Cette concession est située au sud-ouest du village éponyme dans le Jura (39). Cette exploitation servait à alimenter l'usine de Tavaux. En 2011, l'exploitant a décidé d'arrêter définitivement cette activité.

Ce rapport constitue le premier volet technique du dossier de Déclaration d'Arrêt Définitif des Travaux miniers et d'utilisation d'installations minières (DADT), dossier d'arrêt de la concession de Poligny. Il analyse les aléas « mouvements de terrain » résiduels liés à l'ancienne exploitation ainsi que le fonctionnement hydrogéologique du site et son évolution sur le long terme. Il s'appuie sur une documentation relativement détaillée provenant principalement des archives de l'exploitant et sur l'analyse de données *in situ* récentes acquises sur une période de 5 ans après l'arrêt définitif de l'exploitation.

La méthode d'exploitation mise en œuvre sur le site de Poligny a été celle des pistes et sondages. Il s'agit d'une méthode de dissolution du gisement de sel par de l'eau douce injectée dans des sondages forés jusqu'à la base de la formation exploitée. L'objectif est d'optimiser la récupération du gisement en dissolvant toute l'épaisseur du gisement selon une bande orientée dans l'axe des sondages alignés (pistes). Il en résulte la création de grandes cavités qui en s'élargissant deviennent instables et s'effondrent, occasionnant en surface de grands effondrements. Cette méthode mise en œuvre à Poligny à partir de la fin des années 1920 et jusqu'en 2011 a permis de produire plus de 32 Mt de sel. Auparavant (1890-1932), une petite exploitation par dissolution au toit du sel avait produit de l'ordre de 0,15 Mt grâce à deux sondages.

Tous les éléments cartographiques utiles à la compréhension de l'ancienne exploitation de sel de Poligny sont reportés sur une carte informative (limite de la concession, position des sondages, zones d'effondrements, d'affaissement...).

L'ensemble des données disponibles et utiles à la caractérisation du site d'exploitation de Poligny et à l'appréciation de son évolution sur le long terme a été synthétisé et organisé au sein d'un Système d'Informations Géographiques (SIG).

Les aléas mouvements de terrain ont pu être évalués et cartographiés grâce à une analyse approfondie en retours d'expérience intégrant les données d'exploitation, les observations et investigations récentes, ainsi que le contexte hydrogéologique. L'analyse de plus de 80 années de nivellement, des données de production, des diagraphies, des sonars ou encore des photographies aériennes a permis de caractériser les mécanismes et critères influençant leur survenue. Trois cartes d'aléa ont été produites correspondant aux trois types de mouvements de terrain potentiels :

- l'aléa effondrement résultant de l'évolution potentielle des cavités (suspectées ou avérées) non effondrées des pistes. Deux niveaux ont été cartographiés, fort et moyen. Cet aléa concerne quasi exclusivement l'intérieur du périmètre clôturé de l'exploitation. Les secteurs non couverts

par ce périmètre feront l'objet d'investigations complémentaires pour préciser l'aléa ;

- un aléa affaissement faible lié à la présence de cavités de faibles dimensions (aval de la piste 1 et anciens sondages au toit du sel) et à la dissolution au toit du sel ;
- un aléa glissement lié à la présence des cratères d'effondrement.

L'exploitation de Poligny a engendré des modifications du contexte hydrogéologique initial dans l'environnement du site. Des sources salées sont notamment apparues dans la forêt de Vaivre. L'analyse des contextes hydrogéologiques, géologiques, d'exploitation et des résultats du suivi des eaux superficielles (sources, réseau hydrographique) et souterraines (piézomètres) a permis de dresser un constat précis de la situation actuelle et des impacts de l'exploitation sur les eaux et d'envisager des scénarios d'évolution. Pour ce qui concerne les impacts, une étude spécifique des effets de la salinité sur les organismes vivants a été conduite. Elle permet de préciser qualitativement et quantitativement les impacts sur le milieu des sources salées. On retiendra que :

- la minéralisation naturellement élevée des ruisseaux du bassin versant amont de l'Orain est augmentée (jusqu'à sept fois supérieure pour les cours d'eau les plus touchés) par les apports de sel en provenance des sources formées en marge de l'exploitation de sel par dissolution ;
- les ruisseaux affichant les concentrations les plus élevées sont le ruisseau de Vaivres et le ruisseau du Son ;
- en termes de toxicité aigüe, les essais réalisés par l'INERIS montrent que des effets significatifs apparaissent sur les invertébrés et les algues lorsque la concentration en NaCl dépasse 5 g.L^{-1} ; en juillet 2016, c'était le cas du ruisseau de Vaivres et du ruisseau du Son ;
- en juillet 2016, au moment de la réalisation de notre diagnostic, la dilution par apport d'eau douce dans les ruisseaux pratiquée par l'exploitant permettait de limiter ces effets au seul ruisseau de Vaivres. Sans cette dilution, le ruisseau de l'Etang et le bief d'Acles auraient été touchés ;
- pour la concentration ayant montré des effets significatifs sur les invertébrés, aucun effet n'a été mis en évidence sur les vertébrés.

Ce rapport est suivi d'une analyse spécifique dédiée aux risques synthétisée dans le rapport « *Arrêt de l'exploitation de sel de la concession de Poligny (Jura, 39), Analyse des risques résiduels liés à l'ancienne exploitation, INERIS DRS-16-160847-11751A* ». En fonction des niveaux de risque évalués et des impacts caractérisés sur les eaux, des solutions compensatoires ainsi qu'une surveillance du site sont proposés.

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION	9
1.1 Objectif de l'étude	9
1.2 Contexte administratif.....	9
1.3 Travaux réalisés.....	11
1.4 Etablissement d'un plan de la concession et d'un SIG.....	12
2. PRÉSENTATION DU SITE.....	13
2.1 Contexte géographique et climatique.....	13
2.2 Contexte hydrologique	13
2.2.1 Les cours d'eau	13
2.2.2 Les plans d'eau	15
2.3 Contexte Géologique.....	15
2.3.1 Stratigraphie de l'exploitation de Poligny	16
2.3.2 Modèle géologique et profondeur des différentes interfaces	18
2.3.3 Description du gisement de sel.....	25
2.4 Contexte hydrogéologique	25
2.4.1 Les circulations d'eau souterraines.....	26
2.4.2 La nappe salée	26
3. HISTORIQUE DE L'EXPLOITATION	29
3.1 Préambule sur les méthodes d'exploitation par dissolution.....	33
3.1.1 Méthode par sondages isolés au toit du sel.....	33
3.1.2 Méthode par pistes et sondages.....	33
3.2 Caractéristiques des exploitations.....	34
3.3 Période « Terville »	35
3.4 Période d'exploitation de la piste 1 (1928-1969)	36
3.5 Exploitation des pistes 100, 200 et 400.....	37
3.6 Exploitation des nouvelles pistes	38
3.7 Apports de saumure d'Etrez.....	39
3.8 Production	39
3.9 Arrêt de l'exploitation.....	41
4. INSTALLATIONS DE SURFACE	43
5. ANALYSE DES MOUVEMENTS DE TERRAIN LIÉS À L'ANCIENNE EXPLOITATION	45
5.1 Historique et analyse des cas d'effondrement.....	45

5.1.1	Descriptif synthétique de l'effondrement de 1943.....	45
5.1.2	Constats d'évolution des cavités	46
5.1.3	Relation entre les productions par sondage et les effondrements	48
5.1.4	Analyse de l'affaissement des têtes de sondage	50
5.1.5	Caractéristiques des effondrements	56
5.2	Historique et analyse des affaissements	60
5.2.1	Evolution spatiale toutes époques confondues.....	61
5.2.2	Amplitude des affaissements.....	62
5.2.3	Evolution dans le temps.....	62
5.2.4	Cas des affaissements de Miéry.....	66
5.3	Déplacements liés aux mouvements de pente.....	69
5.4	Analyse spécifique du contexte de l'aval de la piste 1.....	70
5.4.1	Diagraphies et mesures sonar.....	70
5.4.2	Investigations dans l'environnement du sondage 8	72
5.4.3	Avis sur la situation de l'aval de la piste 1	73
6.	EVALUATION DES ALÉAS	76
6.1	Rappels.....	76
6.2	Alea effondrement lié aux cavités de dissolution.....	76
6.2.1	Phénomène redouté	76
6.2.2	Evaluation de la prédisposition	77
6.2.3	Evaluation de l'intensité	78
6.2.4	Evaluation de l'aléa.....	79
6.2.5	Cartographie de l'aléa.....	79
6.3	Aléa affaissement lié à la rupture du toit de cavité de faibles dimensions...80	
6.3.1	Phénomène redouté	80
6.3.2	Evaluation de la prédisposition	80
6.3.3	Evaluation de l'intensité	81
6.3.4	Evaluation de l'aléa.....	83
6.3.5	Cartographie de l'aléa.....	83
6.4	Aléa affaissement lié à la dissolution au toit du sel	83
6.4.1	Phénomène redouté	83
6.4.2	Evaluation de la prédisposition	83
6.4.3	Evaluation de l'intensité	84
6.4.4	Evaluation de l'aléa.....	84
6.4.5	Cartographie de l'aléa.....	84

6.5	Alea glissement lié aux cratères d'effondrement.....	85
6.5.1	Phénomène redouté	85
6.5.2	Evaluation de la prédisposition	85
6.5.3	Evaluation de l'intensité	85
6.5.4	Evaluation de l'aléa.....	85
6.5.5	Cartographie de l'aléa.....	86
7.	CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE ET HYDROLOGIQUE	87
7.1	Introduction	87
7.2	Identification des aquifères en présence	88
7.2.1	Apport de l'étude des paramètres physico-chimiques	88
7.2.2	Apport de l'étude des éléments majeurs.....	89
7.3	Influence sur les eaux de surface.....	92
8.	FONCTIONNEMENT HYDROGÉOLOGIQUE ANTHROPISE	95
8.1	Hypothèses de fonctionnement.....	95
8.1.1	Premières hypothèses sur le fonctionnement du système de Poligny	95
8.1.2	Mécanisme d'alimentation des sources salées.....	96
8.1.2.1	Apport des investigations récentes réalisées par l'exploitant	96
8.1.2.2	Schéma de fonctionnement hydrogéologique pré-exploitation	97
8.1.2.3	Schéma de fonctionnement actuel	98
8.2	Evolution des exutoires salés au cours du temps	99
8.2.1	Analyse des différentes phases d'évolution hydrogéologiques.....	99
8.2.2	Fonctionnement actuel	101
8.2.3	Evolutions possibles du flux de sel aux sources.....	102
9.	IMPACT SUR LES EAUX DE SURFACE.....	105
9.1	Protocole expérimental.....	105
9.1.1	Contexte des investigations.....	106
9.1.1.1	Contexte hydrologique des investigations	106
9.1.1.2	Contexte hydrogéologique en lien avec l'exploitation.....	108
9.1.1.3	Synthèse sur les conditions de réalisation des prélèvements.	109
9.2	Cartographie de la salinité.....	109
9.2.1	Calcul des concentrations en NaCl.....	109
9.2.2	Cartographie de la salinité	110
9.3	Impact des sources salées sur les organismes vivants aquatiques	112
9.3.1	Résultats des bio-essais.....	112

9.3.1.1	Toxicité chronique sur les invertébrés	112
9.3.1.2	Toxicité aiguë sur les invertébrés et les algues	114
9.3.2	Situation des cours d'eau en juillet 2016	115
9.3.2.1	Situation de l'Orain	115
9.3.2.2	Situation dans le ruisseau de Vaivres	115
9.3.2.3	Situation du bief d'Acles	115
9.3.2.4	Le ruisseau des Buats	115
9.3.2.5	Le ruisseau du Son	115
9.3.3	Synthèse.....	115
10.	CONCLUSION.....	117
11.	BIBLIOGRAPHIE	119
12.	LISTE DES ANNEXES	121

1. INTRODUCTION

1.1 OBJECTIF DE L'ÉTUDE

La société SOLVAY a exploité par dissolution, depuis 1929, la concession de sel de Poligny et située au sud-ouest du village éponyme dans le Jura (39). Cette exploitation servait à alimenter l'usine de Tavaux.

En 2011, l'exploitant a décidé d'arrêter définitivement cette activité.

Dans ce contexte, l'exploitant a sollicité l'INERIS afin de réaliser les études techniques du dossier de Déclaration d'Arrêt Définitif des Travaux miniers et d'utilisation d'installations minières (DADT).

Ce rapport constitue le volet technique du dossier d'arrêt définitif des travaux miniers de la concession de Poligny. Actuellement, la société SOLVAY ELECTROLYSE France (devenue INOVYN France) est toujours titulaire de cette concession.

. Il a pour objectif de :

- synthétiser l'ensemble des informations géologiques, géotechniques et hydrogéologiques disponibles sur l'ancienne exploitation, qui pourraient être utiles à l'analyse des risques résiduels sur l'ensemble du territoire couvert par la concession considérée ;
- définir, en fonction des informations disponibles, les différents aléas « mouvements de terrain » résultant de l'arrêt de l'exploitation du site.

1.2 CONTEXTE ADMINISTRATIF

Après une demande effectuée fin 1892, une concession de mine de sel gemme est octroyée le 15 février 1894 à M. Louis BAURY (Société en Participation de Recherche de Sel gemme) pour une superficie d'environ 1400 ha.

La concession de Poligny s'étend sur le territoire des communes de Poligny principalement, Miéry, Saint-Lothain et Tourmont pour une plus faible superficie. Elle jouxte la concession de sel, non exploitée, de Miéry, située plus au sud (Figure 1 et Tableau 1).

Tableau 1 : Coordonnées des sommets de la concession de Poligny

Bornes	Coordonnées en Lambert-II (zone centre) en m	
	X	Y
A	857273,80	209690,30
F	854647,00	206900,60
E	852745,90	206147,60
D	852064,00	208042,20
H	854618,30	211473,00

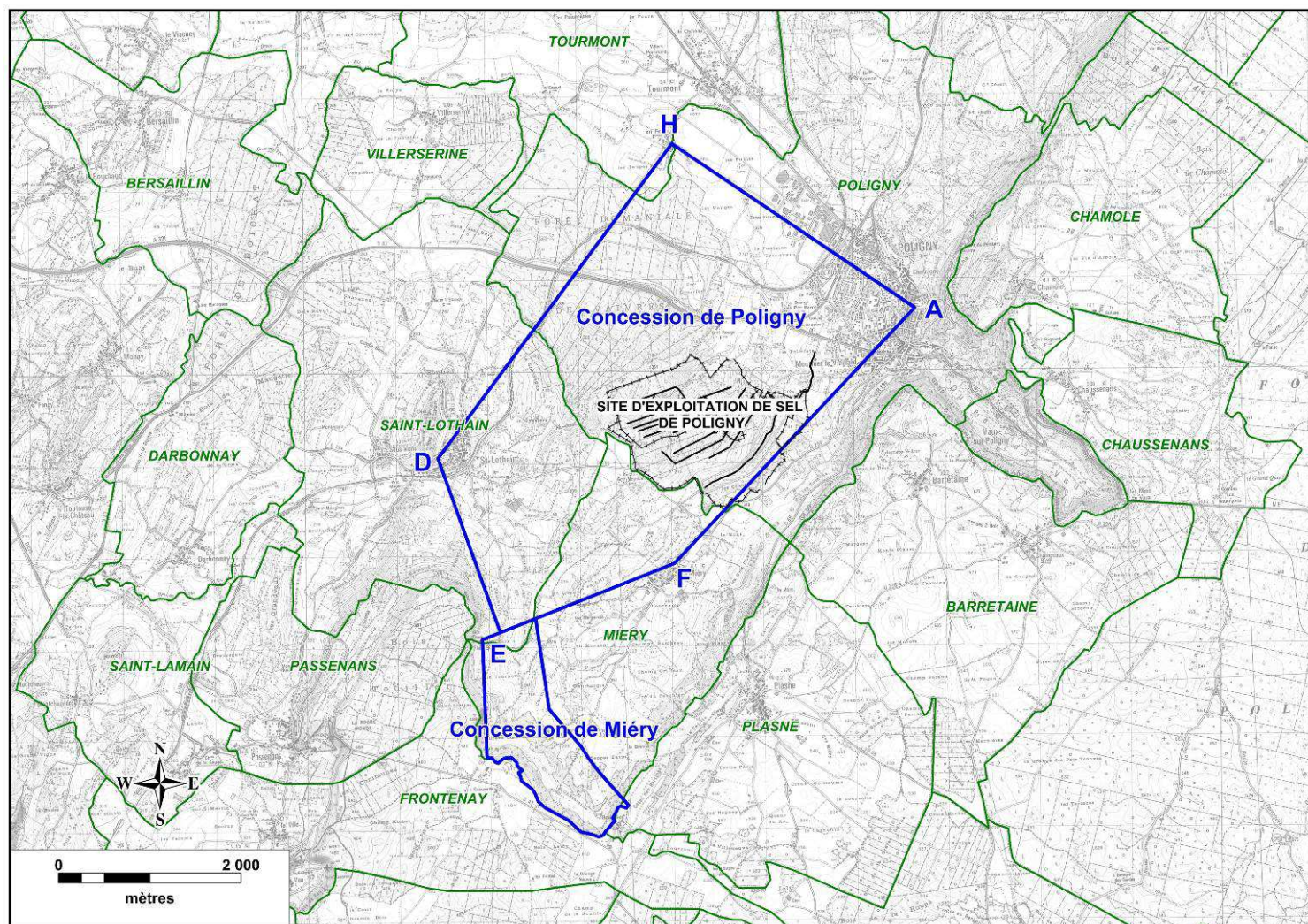


Figure 1 : Localisation de la concession de Poligny

En octobre 1894, la Compagnie des Mines de sel de Poligny (CMS) est créée pour une durée de 50 ans, prorogée en décembre 1936 pour une durée de 99 ans à partir de cette date.

Vers 1925, la Compagnie des Mines de Sel de Poligny est rachetée par SOLVAY (SLV) et devient l'une de ces filiales.

Actuellement, la société SOLVAY ELECTROLYSE France (devenue INOVYN France) est toujours titulaire de cette concession.

1.3 TRAVAUX RÉALISÉS

Les différentes étapes de travaux réalisés pour constituer ce rapport sont listées ci-après. Elles se sont étalées sur plusieurs années permettant de disposer d'un recul suffisant d'observation des paramètres de suivi du site de Poligny pour évaluer les conséquences sur le long terme de l'ancienne exploitation. Une synthèse de l'ensemble des données disponibles a pu être effectuée, intégrant les résultats de plusieurs campagnes d'investigation complémentaires réalisées par l'exploitant et définies pour compléter ou mettre à jour les données d'exploitation.

Les différentes phases de travaux ont été menées en collaboration étroite entre l'exploitant et l'INERIS. La plupart des campagnes d'investigation complémentaires ont été réalisées ou pilotées par l'exploitant avec l'assistance de l'INERIS qui avait préalablement défini les travaux à mener.

Consultation des archives :

Cette phase essentielle a principalement consisté à passer en revue la très importante documentation (papier et numérique) de l'exploitant. L'essentiel des données disponibles était centralisé dans les locaux de l'exploitant sur le site d'exploitation de Poligny.

Les Archives Nationales à Paris et la Banque Nationale du Sous-sol du BRGM ont également été consultées (site internet).

Investigations de terrain et campagnes complémentaires :

Une première synthèse des données disponibles, intégrant les données des archives, et une inspection complète du site ont été réalisées en 2011 à l'issue de l'arrêt de l'exploitation.

Sur cette base, des premières actions de suivi du site ont été définies pour acquérir une compréhension optimale du site.

Sur la période 2012-2013 :

- équipement par l'exploitant de trois résurgences salées de la forêt de Vaivres pour suivre en continu le débit et la température de l'eau ;
- inventaire des exutoires et campagnes de mesures et prélèvements sur les eaux de surface et souterraines (sondages, piézomètres) ;
- recherche et localisation au GPS différentiel de l'ensemble des vestiges de l'ancienne exploitation (anciens sondages, effondrements...) ;
- campagne d'investigation dans tous les sondages accessibles et pénétrables avec moyens légers (hors moyens lourds de forage) incluant une diagraphie gamma-ray ;

- établissement d'une base de données des sondages et coupes longitudinales de référence des pistes¹ présentant toutes les données utiles (exploitation, géologiques) à l'analyse de l'évolution du site sur le long terme.

Sur la période 2014-2016 :

- réalisation de piézomètres supplémentaires permettant de préciser les circulations d'eaux salées sur le site ;
- campagne complémentaire de diagraphie gamma-ray et gamma-gamma dans 20 sondages ;
- investigations spécifiques sur l'aval de la piste 1 : tests de conductivité hydraulique, foration des bouchons de ciments présents pour caractériser les cavités existantes par sonar, terrassements.

1.4 ETABLISSEMENT D'UN PLAN DE LA CONCESSION ET D'UN SIG

Tous les éléments cartographiques utiles à la compréhension de l'ancienne exploitation de sel de Poligny sont reportés sur le plan présenté en Annexe 7 (limite de la concession, position des sondages, zones d'effondrements, d'affaissement...).

L'ensemble des données disponibles et utiles à la caractérisation du site d'exploitation de Poligny et à l'appréciation de son évolution sur le long terme a été synthétisé et organisé au sein d'un Système d'Informations Géographiques (SIG).

Le SIG a été établi sous MAPINFO. Il comprend des informations géoréférencées dans le système de coordonnées Lambert II (zone centre) sur :

- les sondages : profondeurs, équipements, états actuels, traitements, dates principales...
- les interfaces géologiques : profondeurs et épaisseurs des horizons géologiques principaux (sel, dolomie). Ces données sont connues grâce aux sondages et peuvent donc être spatialisées finement dans le champ d'exploitation (200 sondages environ) ;
- les données hydrogéologiques : sources, niveaux piézométriques, de l'interface ED/ES²
- les cavités : profondeurs, dimensions, dates des inspections ;
- les cratères : dimensions, dates d'apparition ;
- le nivellement : bornes et valeurs de l'affaissement en fonction du temps pour chacune d'entre elles.

¹ Piste : alignement de sondages, tubés et cimentés sur toute leur hauteur, foncés jusqu'à la base du gisement de sel et connectés entre eux par un chenal de dissolution.

² ED : Eau douce, ES : Eau salée (saturée)

2. PRÉSENTATION DU SITE

2.1 CONTEXTE GÉOGRAPHIQUE ET CLIMATIQUE

La concession de Poligny se situe à environ 50 km au sud-ouest de Besançon et à moins de 15 km au nord de Lons-le-Saunier.

La formation de sel visée par la concession de Poligny appartient à l'unité géologique du Revermont, dans la zone de transition entre le premier plateau jurassien, à l'est (environ 550 m NGF) et la plaine bressane, à l'ouest (environ 300 m NGF dans le secteur de Poligny). Cette structure géologique marque la bordure ouest du massif jurassien. D'un point de vue géomorphologique cette zone est soulignée par un ressaut topographique au pied duquel se situe le site d'extraction de sel (Figure 3).

A l'intérieur du périmètre du site d'exploitation, les points bas correspondent aux vallées de la rivière Orain et d'un de ses affluents qui limitent l'exploitation au nord.

La concession de Poligny se situe sur le territoire des communes de Poligny principalement, Miéry, Saint-Lothain et Tourmont pour une plus faible superficie.

La région de Poligny est soumise à un climat continental tempéré. A la station de Besançon (<http://climat.meteofrance.com>) la plus proche du site, la température moyenne minimale en hiver est de 6,6°C et la température moyenne maximale en été est de 15,3°C. La moyenne pluviométrique annuelle atteint 1187,0 mm pour un total de 141 jours de pluie. Les précipitations sont relativement bien réparties sur les 12 mois de l'année.

2.2 CONTEXTE HYDROLOGIQUE

2.2.1 LES COURS D'EAU

Sur le site de Poligny et à proximité, la nature marneuse et évaporitique des terrains concernés exclut la présence d'aquifères importants et permet l'existence d'écoulements d'eau de surface.

La concession de Poligny s'étend sur deux bassins versants : celui de l'Orain au nord et celui de la Brenne au sud. Ces deux cours d'eau drainent plusieurs ruisseaux temporaires ou pérennes (Figure 2).

Au sud de Miéry et de Saint-Lothain, les ruisseaux de l'Épinette et des Bordes alimentent la Brenne. Au niveau de la zone exploitée, un certain nombre de ruisseaux (permanents ou temporaires) alimentent l'Orain en rive gauche à l'aval de Poligny. La forêt située à l'ouest est drainée par le ruisseau de Vaivres qui alimente l'Orain au niveau du village de Brainans situé au nord-ouest de la zone étudiée.

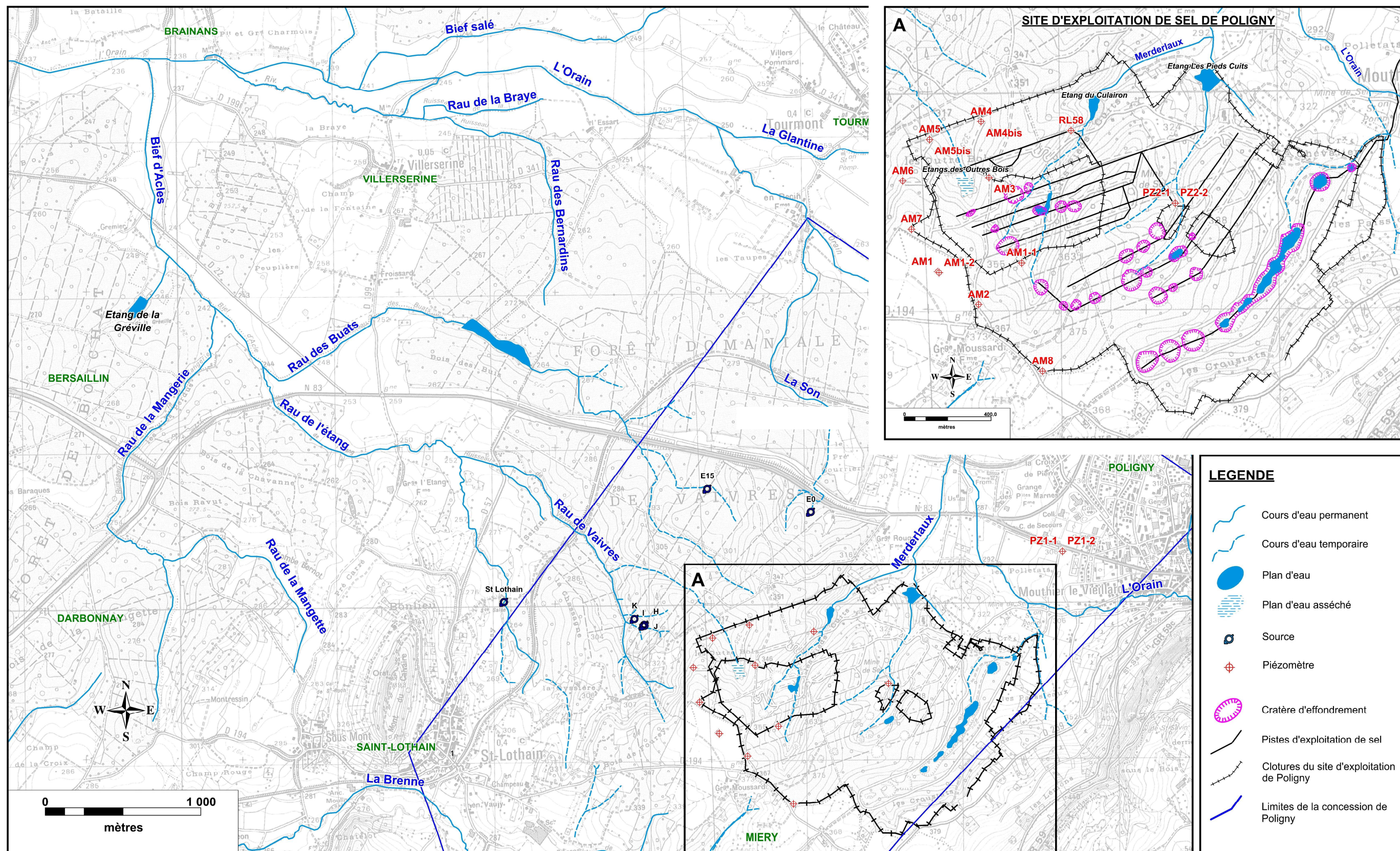


Figure 2 : Réseau hydrographique et localisation des piézomètres sur le site et à proximité de Poligny

2.2.2 LES PLANS D'EAU

Sur le site de Poligny, les plans d'eau présents sont tous artificiels. On dénombre (Figure 2, Annexe 7) :

- l'étang du Culairon ;
- l'étang des Pieds Cuits (ou de Terville) ;
- les effondrements en eau, situés aux points bas topographiques du site minier. Certains effondrements sont en eau de manière temporaire (selon les saisons), tandis que d'autres le sont continuellement (piste 1, cratère 165, cratère 1510 et cratère 1512).

A noter enfin, qu'un étang situé à l'ouest du site de Poligny, à l'amont de la piste 600 et au nord de la partie amont de la piste 500, s'est vidangé en juin 2013 (Annexe 7).

2.3 CONTEXTE GÉOLOGIQUE

Les plateaux du massif jurassien sont constitués d'une succession de terrains marneux et de calcaires datant du Jurassique moyen et supérieur (Figure 3). La zone concernée par la concession se situe stratigraphiquement plus bas que les terrains situés à l'est. L'exploitation intègre donc les terrains du Lias et du Trias. Les faciès sont marneux pour le Lias et évaporitiques pour le Trias (Figure 3).

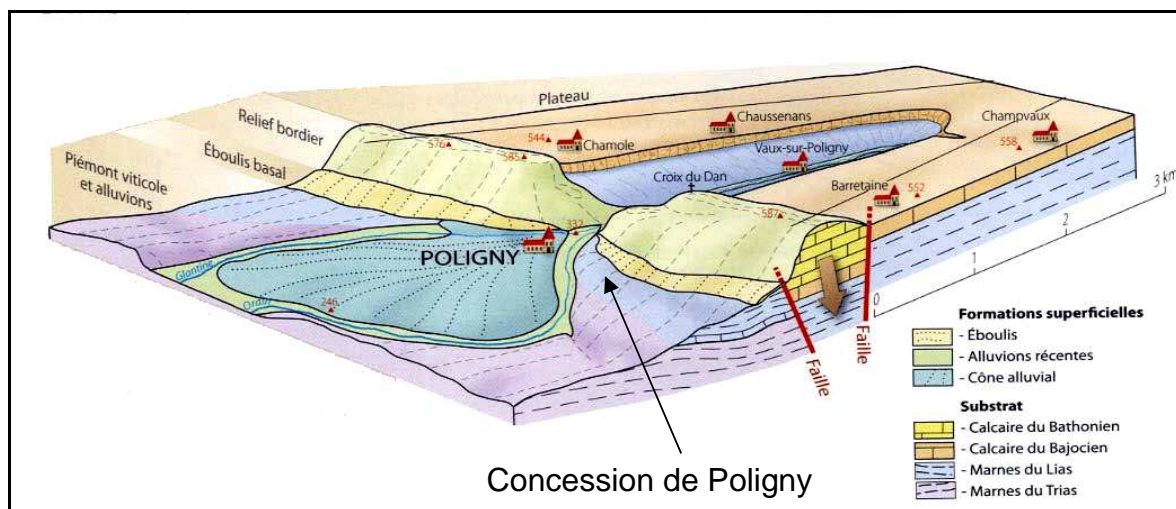


Figure 3 : Bloc diagramme présentant le contexte géologique de la région de Poligny (D'après Bichet et Campy, 2009)

D'un point de vue structural, le secteur de Poligny est tabulaire avec un découpage lié à une fracturation de direction NE/SW (Figure 3). Cette fracturation s'est développée lors de la formation du massif jurassien (phases tectoniques alpines datant de l'Oligocène et du Miocène). La bordure ouest du massif montre le chevauchement d'une partie des terrains situés à l'est sur les formations situées à l'ouest et notamment sur les formations tertiaires du fossé Bressan. Durant cette phase de chevauchement, la formation salifère exploitée s'est comportée en « couche savon », ce qui a localement pu induire des variations importantes d'épaisseur.

2.3.1 STRATIGRAPHIE DE L'EXPLOITATION DE POLIGNY

Depuis la surface jusqu'à sa base, le gisement de Poligny est composé des horizons suivants, dont l'âge s'étend du Toarcien au Keuper Moyen (Figure 4) :

- les terrains les plus jeunes sont représentés au niveau du village de Miéry par les calcaires à gryphées du Sinémurien qui surmontent les grès et calcaires de l'Hettangien ainsi que des marnes et des dolomies du Rhétien ;
- viennent ensuite les marnes irisées du Keuper supérieur affleurant au sein même de l'exploitation. Cet étage peut être divisé en 3 ensembles (de haut en bas) :
 - Ensemble 1 : épais de 25 à 55 m, formé de bancs d'anhydrites alternant avec des marnes bariolées, généralement de couleur rouge. Cette formation est la seule qui affleure dans le périmètre des pistes,
 - Ensemble 2 : zone dolomitique ; 25 à 30 m avec alternances de bancs de dolomie (dont le banc repère de dolomie de 2 mètres), d'anhydrite de marne et de gypse,
 - Ensemble 3 : marnes bariolées prédominantes et dolomie sans anhydrite (20 à 60 m).
- le Keuper moyen, d'une épaisseur de 25 m environ, se décompose en plusieurs niveaux : la dolomie moellon, des argiles bariolées et des grès à roseaux. De la même manière que le banc de dolomie de 2 m, la dolomie moellon forme un niveau repère dans la géologie régionale. Elle est aussi appelée "Dolomie de Beaumont" ou "Dolomie de 10 m" ;
- le Keuper inférieur, où se situe la formation salifère exploitée, dont la puissance est de plus de 150 m. Le toit de la série salifère est constitué d'argiles versicolores décrites dans le sondage de Miéry 1. L'épaisseur de ces argiles est variable selon les sources d'informations : de 13 m à 40 m. Les différences de cote du toit du sel et du banc repère de dolomie moellon permettent de retenir une valeur pour l'épaisseur de ces argiles de l'ordre de 30 à 40 m dans le périmètre du champ d'exploitation (dans l'hypothèse d'une épaisseur relativement constante du Keuper moyen). Le « système du sel massif » (Figure 4) semble avoir une épaisseur d'une centaine de mètres au moins. Au sein de celui-ci, une épaisseur plus réduite dite « exploitable » a été caractérisée par l'exploitant. Elle varie de 40 à 80 m maximum.

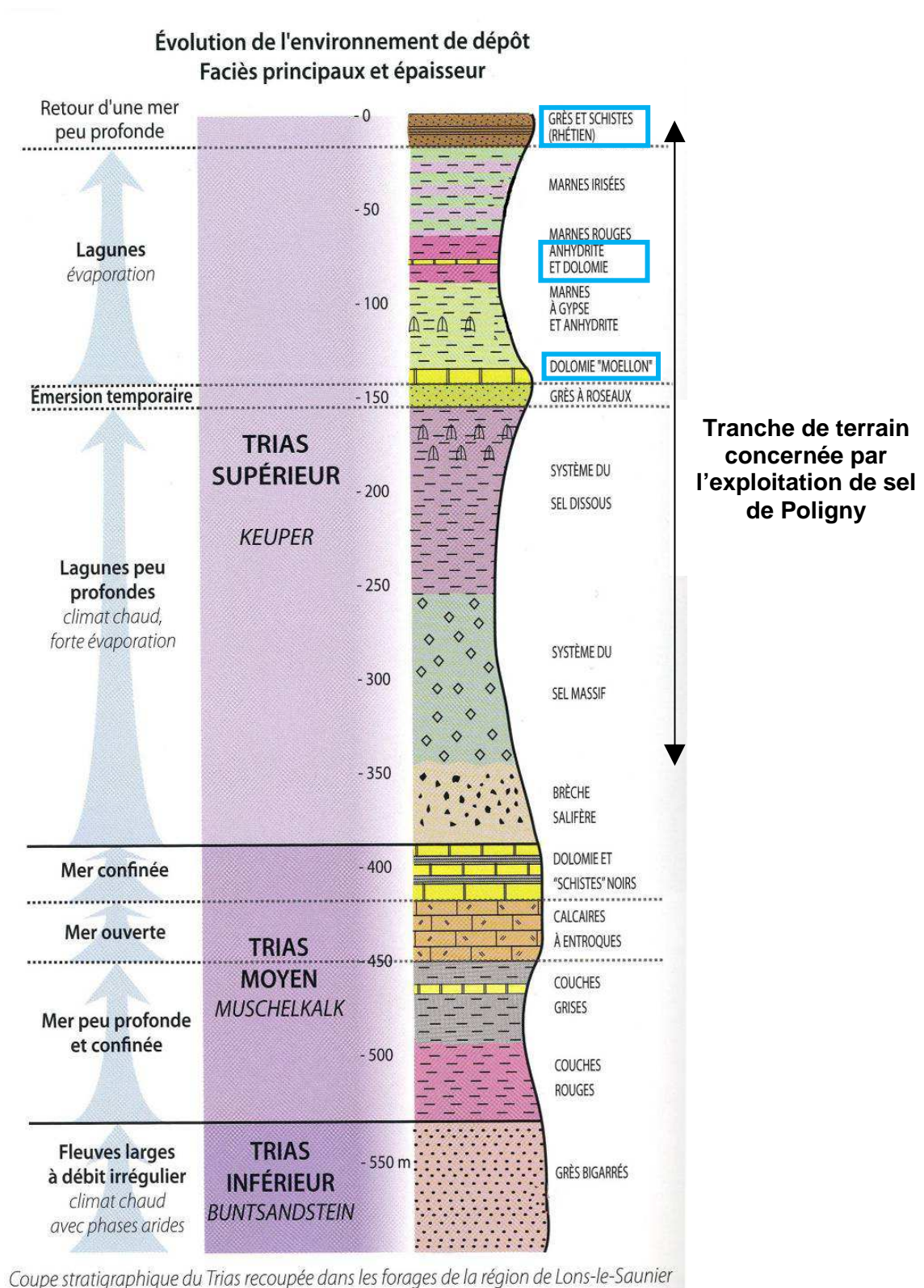


Figure 4 : Log lithostratigraphique des terrains du Trias de la région de Poligny et contexte paléogéographique des dépôts (D'après Bichet et Campy, 2009)
Les niveaux drainants sont entourés en bleu

2.3.2 MODÈLE GÉOLOGIQUE ET PROFONDEUR DES DIFFÉRENTES INTERFACES

A partir des informations géologiques recensées durant toute la durée de l'exploitation du site de Poligny, un modèle des différentes interfaces de l'exploitation a pu être construit localisant 3 « niveaux repères » importants dans le fonctionnement du site :

- la dolomie 2 mètres,
- la dolomie moellon,
- le toit du gisement de sel.

Des cartes d'iso-valeurs du toit de ces niveaux repères (*Figure 5*, *Figure 6* et *Figure 7*) ont pu être établies en interpolant les données des interfaces connues pour chaque sondage et organisées dans des tables spécifiques d'un SIG. Ces cartes ont une relativement bonne précision à l'intérieur du champ d'exploitation³, là où le semi de points constitué par les sondages est dense. On n'accordera par contre qu'une confiance limitée aux cartographies réalisées dans les secteurs où il n'existe que peu d'informations. Signalons enfin que ces interpolations ne tiennent pas compte du réseau de fracturation du site qui peut perturber localement la profondeur des interfaces, la restitution présente donc des interfaces lissées par rapport à la réalité.

Banc de dolomie de 2 m :

La dolomie 2 m peut être divisée en deux zones (*Figure 5*) :

- une zone basse, proche des 300 m NGF, à l'est du champ d'exploitation, au niveau des sondages des pistes 1 et 200 ainsi que des premiers sondages des pistes 100 et 400 ;
- à l'ouest, une zone haute, proche de 310 m NGF, avec des variations d'altitudes importantes allant de plus de 304 à moins de 274 m NGF. Pour expliquer ce ressaut brutal, la présence d'un faisceau de failles ou d'un faisceau de fractures de direction nord-sud peut être avancée.

Banc de dolomie moellon (ou dolomie de 10 m) :

D'une épaisseur stable, de l'ordre de la dizaine de mètres, son toit est majoritairement proche de la cote 240 m NGF aux alentours de la zone d'exploitation. La dolomie-moellon s'individualise en deux zones pseudo-tabulaires (*Figure 6*) :

- à l'est, une zone basse proche des 230 m NGF qui englobe la majorité des sondages des pistes 1 et 200 ainsi que les premiers sondages des pistes 100 et 400 ;
- à l'ouest une zone haute proche de 240 m NGF en moyenne. Cette zone se caractérise par des variations d'altitude importantes, intervenant sur de petites distances, allant de plus de 254 m à moins de 238 m NGF et probablement liées à des accidents tectoniques.

³ Évaluée à quelques mètres dans les secteurs où il y a beaucoup de sondages et probablement inférieure au décimètre entre les pistes.

Toit du sel

Concernant la zone exploitée, le toit de la formation salifère se situe aux environs de la cote 180 m NGF (Figure 7). La densité de forages dont dispose l'exploitant permet de discerner une zone basse au nord-est (150 m NGF vers le lieu-dit « Croix Chevalier ») et une zone haute au sud-ouest de l'exploitation (proche de 200 m à proximité de la route D194 : Les Outre Bois - Grange Moussard - Savoye). Ce toit semble s'abaisser au nord et à l'ouest de l'exploitation. Cette tendance n'est confirmée que par la présence d'un seul sondage au nord (SD.IV) au droit duquel le toit du sel se trouve à 145 m NGF. L'hypothèse d'un décalage dû à des failles est possible si l'on prolonge celles qui sont indiquées sur la carte géologique.

Au sud de la zone d'exploitation, trois *apex*⁴ au toit du sel ont été mis en évidence grâce aux forages disponibles (Miéry 1 en 1972) et aussi grâce à des sondages électriques réalisés en 1972 par le BRGM. Le premier *apex* se trouve au nord-est de Miéry et culmine à 200 m NGF. Les seconds se localisent dans un alignement vers le sud-est, au sud de Miéry et culminent entre 202 et 204 m NGF.

⁴ Sommet du gisement

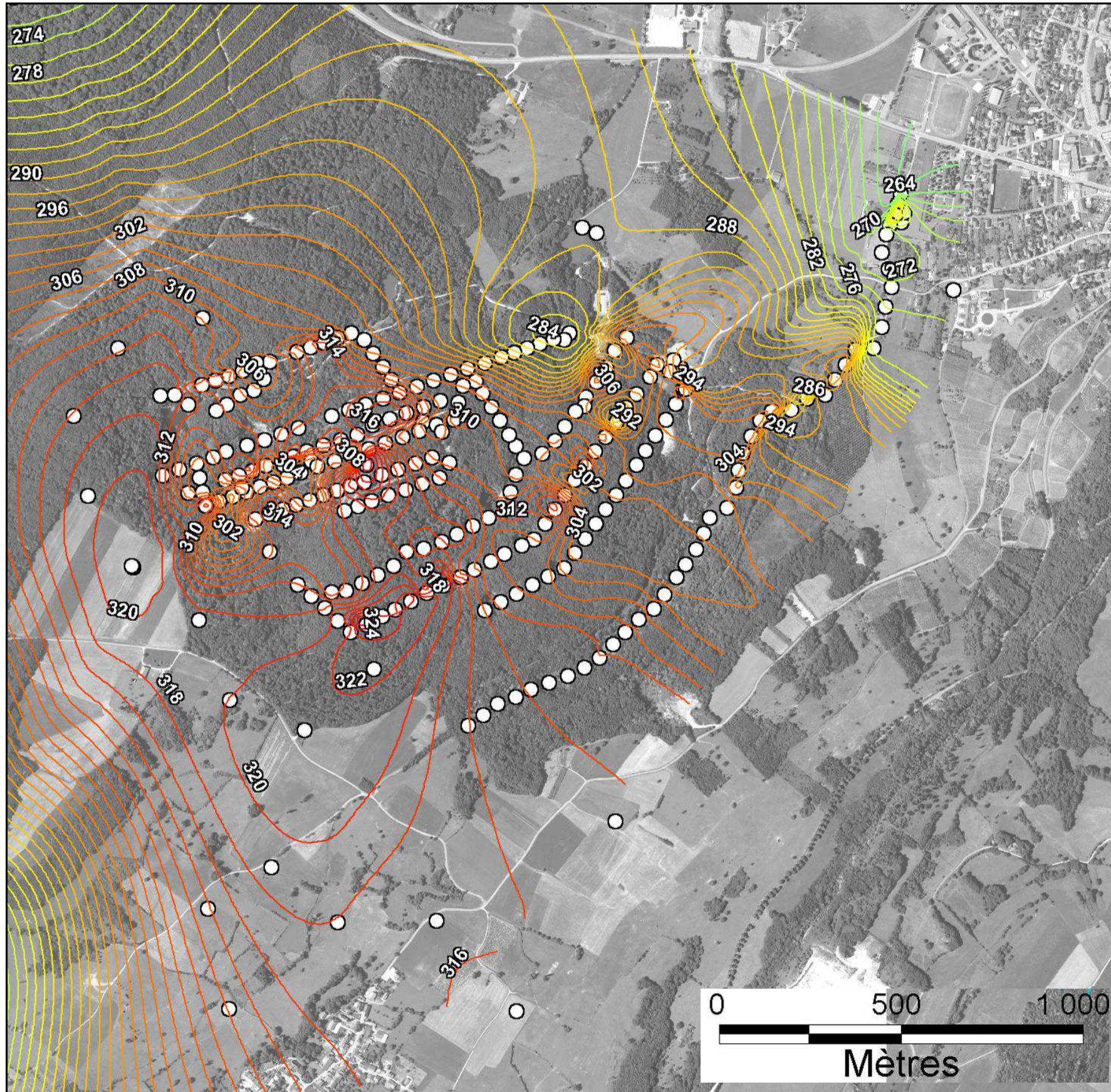


Figure 5 : Cotes du toit du banc de dolomie 2 m (en m NGF)

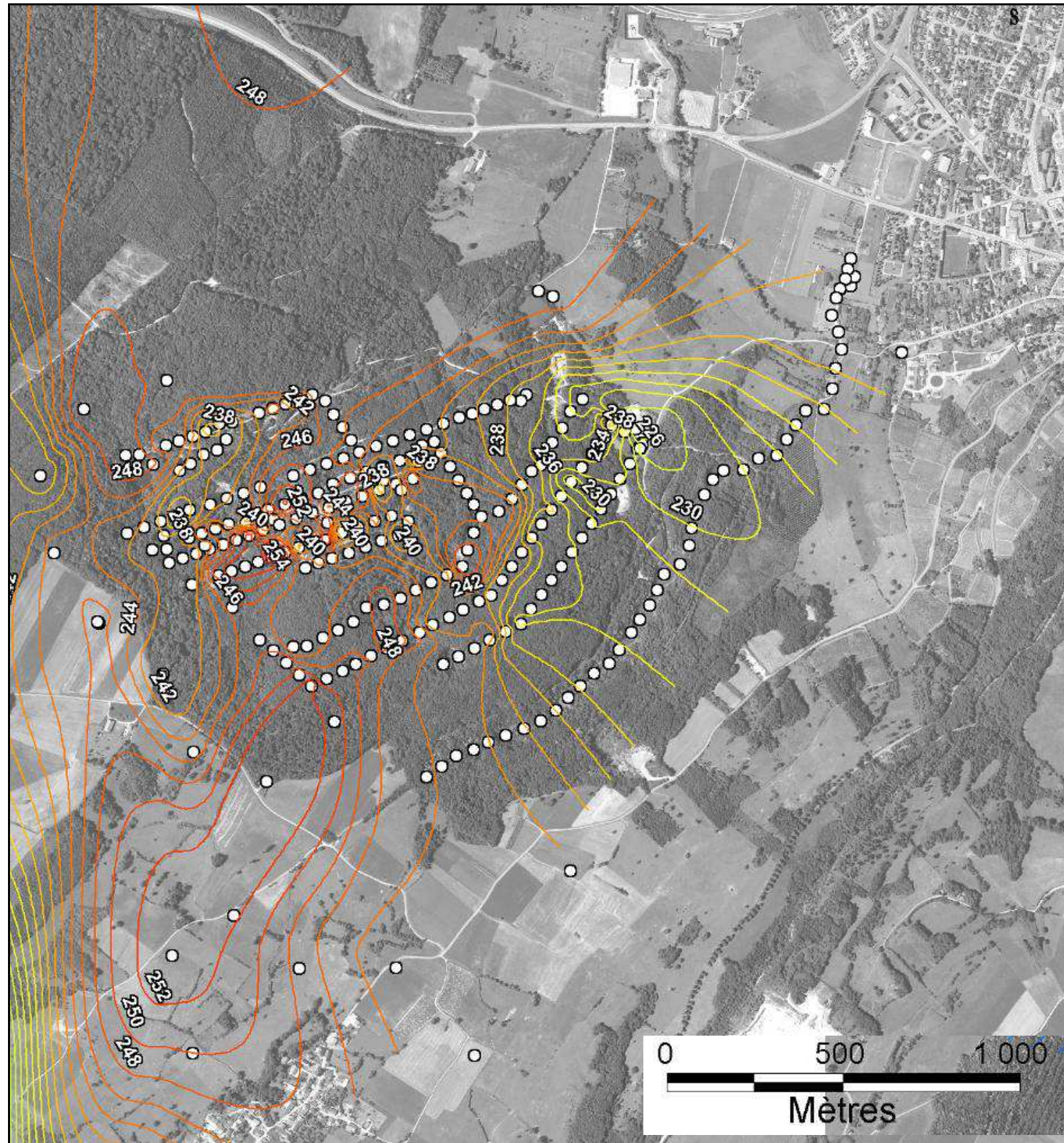


Figure 6 : Cotes du toit du banc de dolomie moellon (en m NGF)

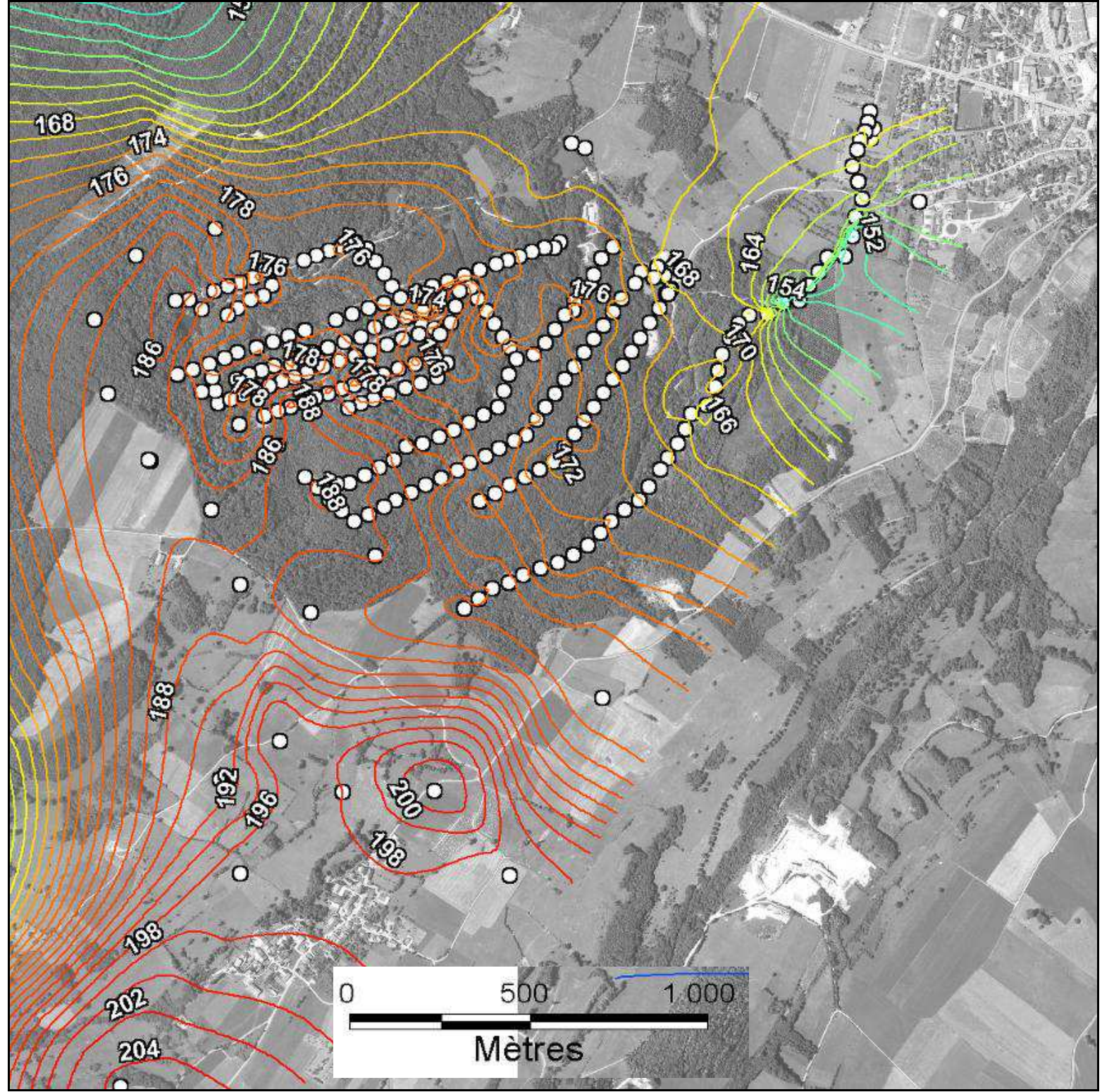


Figure 7 : Cotes du toit du sel (en m NGF)

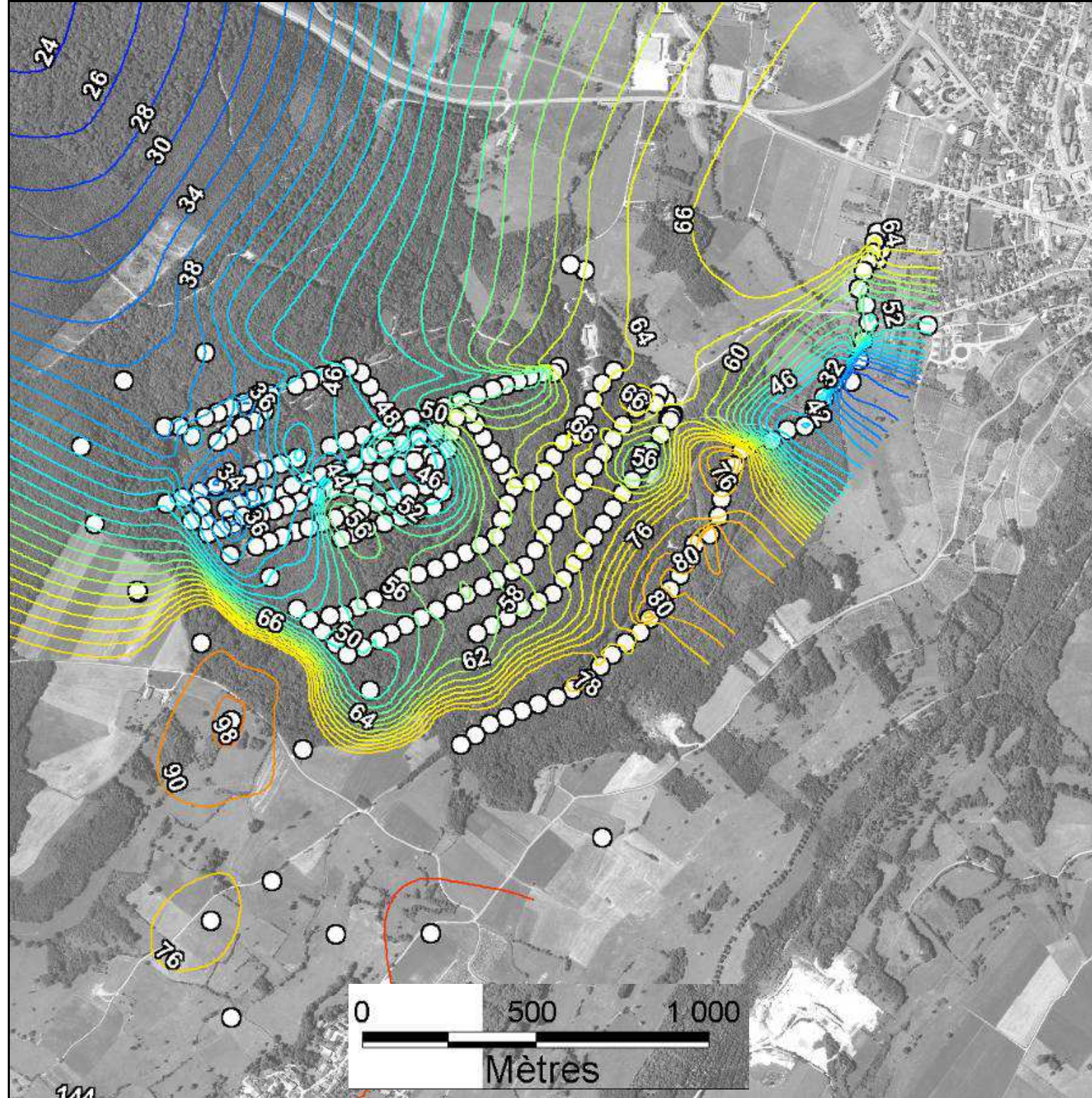


Figure 8 : Epaisseur de la couche de sel (en m)

2.3.3 DESCRIPTION DU GISEMENT DE SEL

Dans la zone exploitée et sa proche périphérie, l'épaisseur du gisement varie de 40 à 80 m (*Figure 8*). Elle est faible au nord-ouest de la zone et croît assez brutalement à l'approche des bordures sud et est, soit, respectivement, un passage de 30 m à environ 80 m, le long de la piste 1. D'une manière générale, malgré le peu d'informations, il semble que toute la zone sud-ouest possède une puissance de sel plus importante.

Le gisement se présente sous la forme de trois horizons salifères appelés faisceaux, dont les caractéristiques lithologiques sont décrites ci-après :

- Premier faisceau :

Il s'agit du faisceau de sel le plus riche (Tableau 2). Il est surmonté d'un horizon marneux à nodules de gypse qui le sépare du reste des terrains du Keuper. Le sel, quasiment pur, se présente sous une minéralisation de couleur saumon à grise. Son épaisseur varie de 29 m au niveau du sondage 101 à seulement 4 m au niveau du sondage 522.

- Deuxième faisceau :

Il est séparé du premier faisceau par un niveau de marnes et d'anhydrite. C'est le niveau salifère le plus perturbé (Tableau 2). Il est riche en polyhalite et entrecoupé de nombreux niveaux marneux et d'anhydrite. Son épaisseur varie de 18 à 23 m.

- Troisième faisceau :

Il s'agit du second faisceau en termes de richesse en sel (Tableau 2). Il est séparé du deuxième faisceau par une succession de niveaux marneux anhydritiques. Il se présente sous la forme d'un banc de sel massif plus riche en éléments marneux lorsque l'on se rapproche du mur du gisement. Son épaisseur, comprise entre 12 et 16 m, varie peu sur toute l'emprise de la concession.

Tableau 2 : Tableau récapitulatif des caractéristiques des trois faisceaux de sel du gisement de Poligny. Exemple des épaisseurs dans le secteur ouest de l'exploitation correspondant aux nouvelles pistes

ESTIMATION D'UN SONDAGE « TYPE » HAUTEUR DU GISEMENT (moyenne S.622 et S.1510)			
	Épaisseur totale en m	Épaisseur de sel en m	% de sel
1^{er} faisceau	11,97	11,97	100 %
2^{ème} faisceau	19,95	8,42	42 %
3^{ème} faisceau	7,94	7,82	98 %
TOTAL	39,87	28,21	71 %

2.4 CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE

Le contexte géologique spécifique et complexe du site de Poligny structure fortement les écoulements souterrains. On observe des contrastes marqués notamment en ce qui concerne la nature et la structure des aquifères locaux. A

cette diversité hydrogéologique naturelle viennent s'ajouter les modifications, tant en termes qualitatifs que structurels, induites par l'exploitation par pistes effondrables, développée par l'exploitant.

Les terrains concernés par l'exploitation ont des capacités aquifères réduites et semblent clairement séparés du système hydrogéologique du premier plateau jurassien par les différents accidents tectoniques à l'origine du ressaut topographique localisé à l'est de la concession.

2.4.1 LES CIRCULATIONS D'EAU SOUTERRAINES

Antérieurement à la période d'exploitation, des écoulements souterrains devaient exister au sein des terrains concernés par l'exploitation. En effet, différents niveaux, notamment les plus superficiels semblent avoir une perméabilité suffisante pour alimenter quelques sources plus ou moins pérennes dans la zone exploitée et dans la forêt de Vaivres.

Avant les interventions d'origine anthropique sur la zone exploitée actuellement par SOLVAY au sud-ouest de Poligny, les horizons géologiques avec présence d'écoulements d'eaux souterraines devaient être les suivants :

- Les grès et dolomies du Rhétien :
Ils constituent l'horizon stratigraphiquement le plus haut susceptible de contenir de l'eau. Cet horizon, d'après notre lecture de la carte géologique, semble être à l'origine d'un certain nombre de sources qui donnent naissance à des ruisseaux intermittents localisés notamment en amont du site d'exploitation au nord et à l'ouest du village de Miéry ;
- Les marnes du Keuper :
Lorsqu'elles existent à l'affleurement elles se présentent sous une forme altérée. Celle-ci permet la formation d'une nappe superficielle qui alimente des ruisseaux en tête des vallons dans la forêt de Vaivre ;
- Les horizons dolomitiques du Trias :
Ils sont principalement au nombre de deux : l'horizon dolomitique dit « dolomie 2 m » et la dolomie à Moellon dite « dolomie 10 m ». Concernant la dolomie 2 m, horizon le plus superficiel, son rôle hydrogéologique en tant qu'aquifère indépendant avant l'exploitation est difficile à apprécier.
En ce qui concerne l'horizon de la dolomie moellon, l'analyse du contexte hydrogéologique montre qu'elle donne naissance à la source salée de Saint-Lothain. Plusieurs documents attestent que l'existence de cette source est antérieure au début de l'exploitation du sel par la méthode des pistes et sondages.

2.4.2 LA NAPPE SALÉE

Il est question ici des connexions qui s'établissent au toit du gisement du fait des dissolutions liées à la mise en contact des masses d'eau douce avec le sel suite aux effondrements.

L'ensemble des écrits consultés ne laisse pas de doute sur le fait que le gisement de sel n'était pas le siège d'une dissolution naturelle avant son exploitation industrielle. Bien que nous n'ayons pas d'information concernant les premiers sondages de Terville, réalisés à la fin du XIX^{ème} siècle, ceux de la piste 1 n'ont pas rencontré de nappe salée naturelle au toit du gisement lorsqu'ils ont été réalisés dans les années 1930.

L'exploitation par pistes effondrables a par contre créé une nappe salée anthropique qui s'est progressivement étendue avec le développement et l'extension spatiale de l'exploitation. Lorsque les effondrements ont lieu, ceux-ci constituent des drains préférentiels des eaux douces météoriques et des terrains encaissants vers le toit du gisement de sel. La dissolution qui peut ainsi se créer à cette interface produit de la saumure qui imprègne les terrains sus-jacents et s'équilibre en fonction du contexte hydrogéologique (influencé ou non par l'exploitation).

Dans ce type de contexte, l'effet associé est en général un affaissement de la surface du sol consécutif à la perte de matière induite par la dissolution. Les zones qui s'affaissent en dehors de l'aplomb direct des pistes sont logiquement cohérentes avec l'extension de la nappe salée qui s'est développée au toit du sel. Sur cette base, l'extension probable de la nappe salée est représentée sur la Figure 9. Il s'agit d'un contour approximatif qui a été établi en considérant le contour des affaissements sur toute la période de mesure réalisée par l'exploitant, de 1934 à 2016. Le seuil de mesure significative est défini à 1 cm.

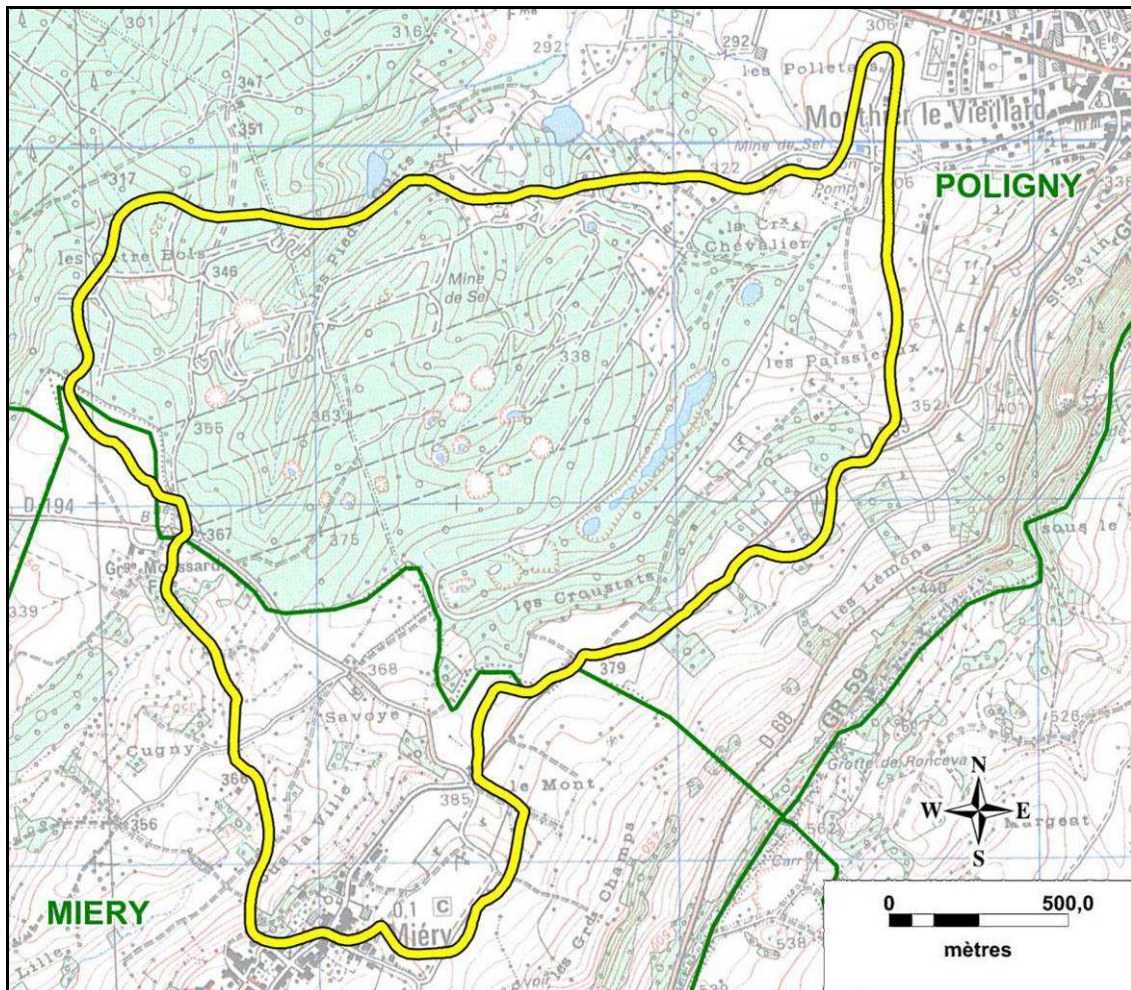


Figure 9 : Estimation de l'extension de la nappe salée (contour jaune) basée sur l'extension des zones d'affaissement de 1934 à 2016

3. HISTORIQUE DE L'EXPLOITATION

L'historique d'exploitation du site de Poligny est présenté en quatre périodes successives, de 1892 à 2011, en fonction de la localisation des sondages (pistes, Figure 10) et de la méthode d'exploitation mise en place.

La Figure 11 synthétise chronologiquement l'ensemble des informations d'exploitation sur le site de Poligny repris dans les différents paragraphes ci-après.

Au total, 11 sondages de recherche, 246⁵ sondages d'exploitation et 12 pistes liés à l'exploitation de sel ont été recensés sur le site de Poligny.

Sont comptabilisés les sondages « bis » ayant été reforés pour diverses raisons techniques et qui se situent à quelques mètres seulement du forage initial.

⁵ 3 sondages n'ont pu être localisés.

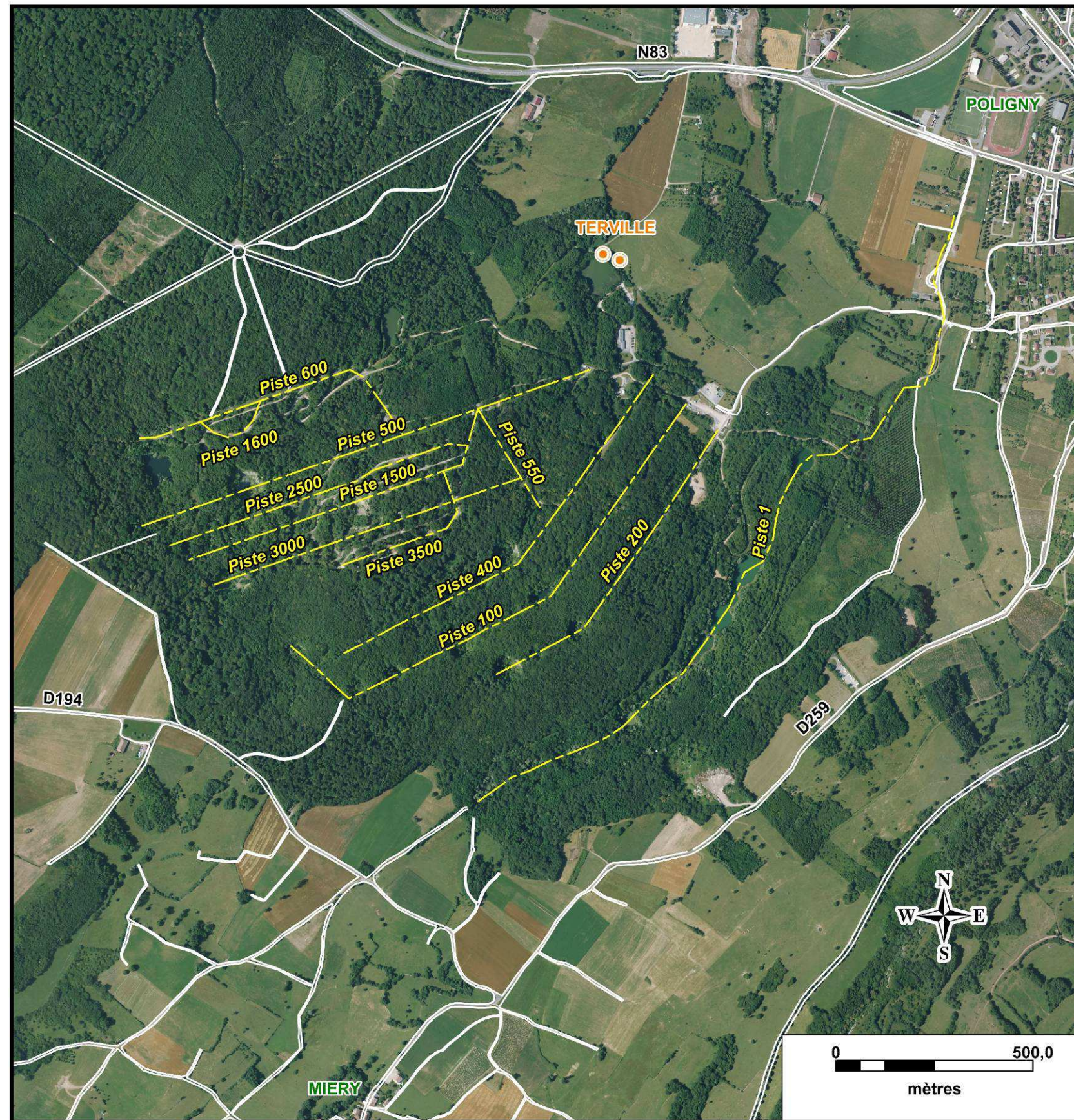


Figure 10 : Localisation des pistes sur le site de Poligny

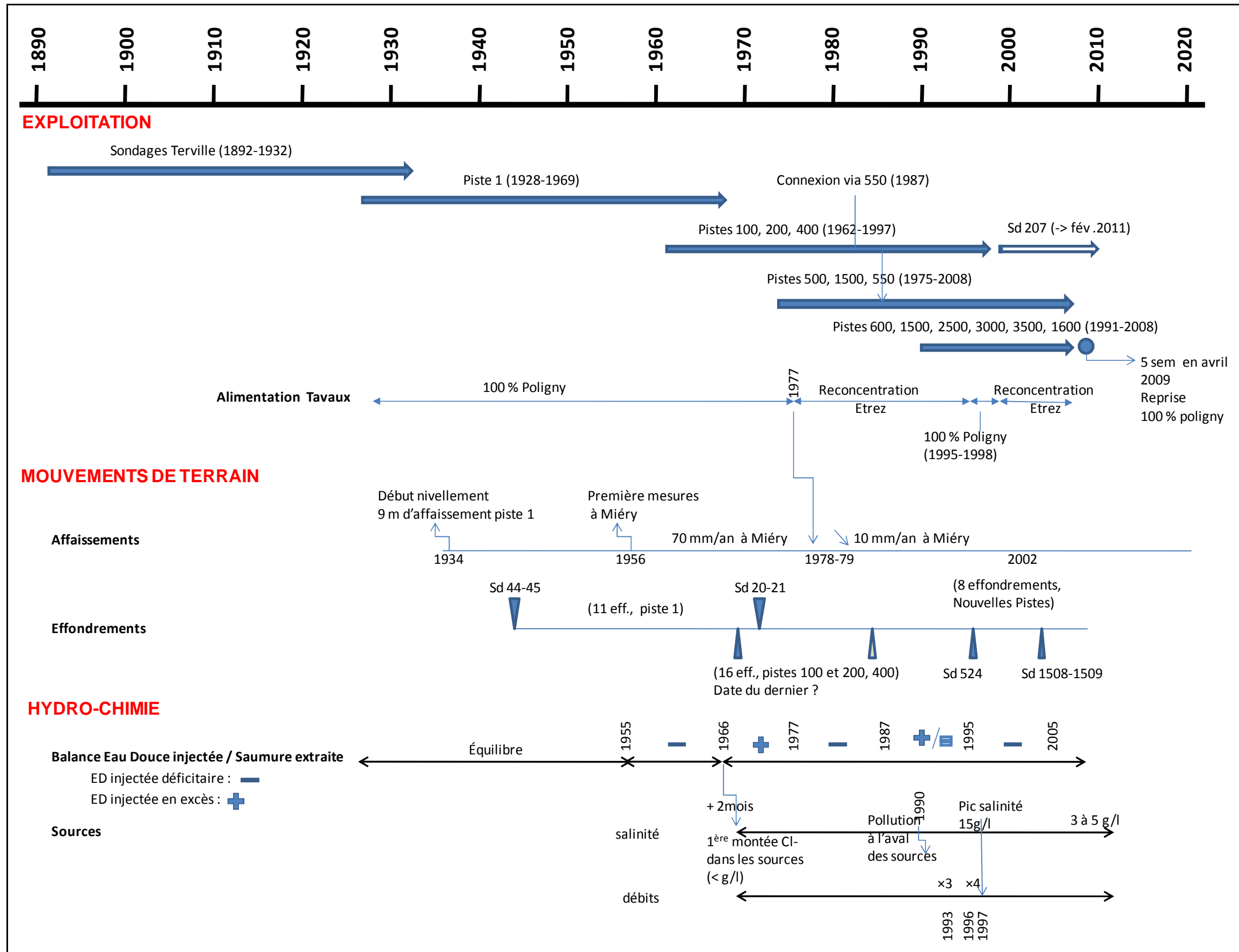


Figure 11 : Chronogramme de l'exploitation du site de Poligny

3.1 PRÉAMBULE SUR LES MÉTHODES D'EXPLOITATION PAR DISSOLUTION

Les caractéristiques principales des deux types distincts de méthode d'exploitation par dissolution qui ont été pratiqués sur le site de Poligny sont rappelées ci-dessous de manière synthétique.

3.1.1 MÉTHODE PAR SONDAGES ISOLÉS AU TOIT DU SEL

Cette méthode, maintenant abandonnée par la plupart des exploitants, était mise en œuvre au début de l'ère industrielle de l'exploitation du sel (à partir de la fin du XIX^{ème} siècle) pour les gisements de sel découverts par forage à faible ou moyenne profondeur (moins de 200 m en général).

Elle consistait à forer jusqu'à rencontrer le sel. Les forages étaient souvent approfondis pour reconnaître l'épaisseur de sel (sur quelques mètres à dizaines de mètres). Ils étaient ensuite tubés et équipés d'une pompe pour y prélever la saumure. En général, les tubages n'étaient pas cimentés à la traversée des terrains encaissants et les eaux douces des terrains sus-jacents cheminaient vers le gisement de sel pour le dissoudre, la saumure étant prélevée à l'intrados du tubage.

Plusieurs variantes ont pu être mises en œuvre selon les sites d'exploitation et les exploitants, en particulier :

- deux tubages concentriques, l'un servant à injecter de l'eau douce, l'autre à pomper la saumure ;
- connexion hydraulique au toit du sel de deux sondages proches, l'un servant ensuite à injecter de l'eau douce, l'autre à pomper la saumure (Figure 12) ;

Dans tous les cas, cette méthode est dite « au toit » car l'eau douce introduite au sommet du gisement ne permettait pas de dissoudre le sel dans la masse mais seulement en surface du gisement. L'eau douce étant moins dense que la saumure, elle chemine donc au toit du gisement et contribue à étendre latéralement la dissolution, parfois très largement. De plus, cet effet est accentué lorsque le toit du gisement de sel est incliné.

Mis à part quelques rares cas correspondant à des conditions d'exploitation et de géologie très particulières, cette méthode de dissolution conduit à l'apparition de mouvements de terrains souples de type affaissement en surface du sol. Les vides créés au toit du sel se referment très rapidement sans avoir atteint des dimensions telles qu'ils pourraient occasionner des effets plus brutaux de type effondrement.

3.1.2 MÉTHODE PAR PISTES ET SONDAGES

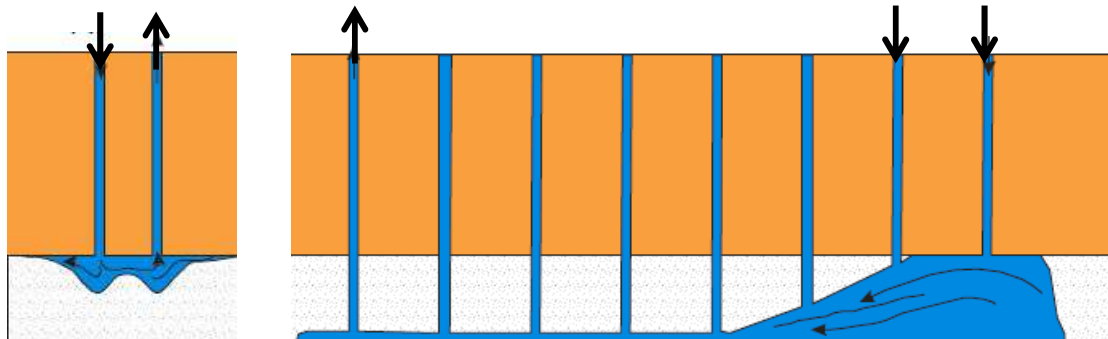
Cette méthode est très spécifique de la société SOLVAY et a été mise au point dans les années 1930, sur plusieurs sites (Sarralbe, Poligny, Haraucourt).

Elle est dite intensive car elle permet d'exploiter la totalité d'un gisement de sel dans son épaisseur et ainsi, pour des gisements épais de plusieurs dizaines de mètres, de garantir une production industrielle importante dans un minimum d'espace.

La méthode consiste à (Figure 12) :

- créer un alignement de sondages forcés jusqu'à la base du gisement de sel. Cet alignement porte le nom de piste. Ces forages sont tubés et cimentés sur toute leur hauteur ;
- connecter hydrauliquement la base de ces sondages par coalescence ; la dissolution est orientée horizontalement par la mise en place d'un plan d'air qui limite l'extension verticale de la dissolution. Cette étape conduit à la formation d'un chenal de dissolution ;
- le plan d'air est enlevé et de l'eau douce est injectée à partir des sondages situés à l'extrémité amont de la piste (sondages injecteurs). La couche de sel peut alors être dissoute dans toute son épaisseur. La saumure, produite par dissolution du sel au droit des sondages où l'eau est injectée, est pompée à l'autre extrémité de la piste par un sondage extracteur ;
- lorsqu'il n'y a plus de sel au droit d'un sondage, l'injection est reportée au sondage aval suivant et ainsi de suite.

Cette méthode industrielle a pour conséquence la création de grandes cavités. Lorsque l'exploitation progresse, les dimensions atteintes sont telles que le toit des cavités n'est plus stable. Les terrains du recouvrement se rompent alors, plus ou moins rapidement, ce qui engendre en surface des effondrements de grandes dimensions (une centaine de mètres pour des profondeurs pouvant atteindre ou dépasser une quarantaine de mètres). En fonction des conditions hydrogéologiques et de la topographie, ces cratères peuvent être en eau de façon permanente ou rester secs.



*Figure 12 : Méthodes d'exploitation de sel par dissolution.
A gauche, schéma d'une exploitation au toit (exemple de connexion de deux sondages),
A droite, une piste en exploitation*

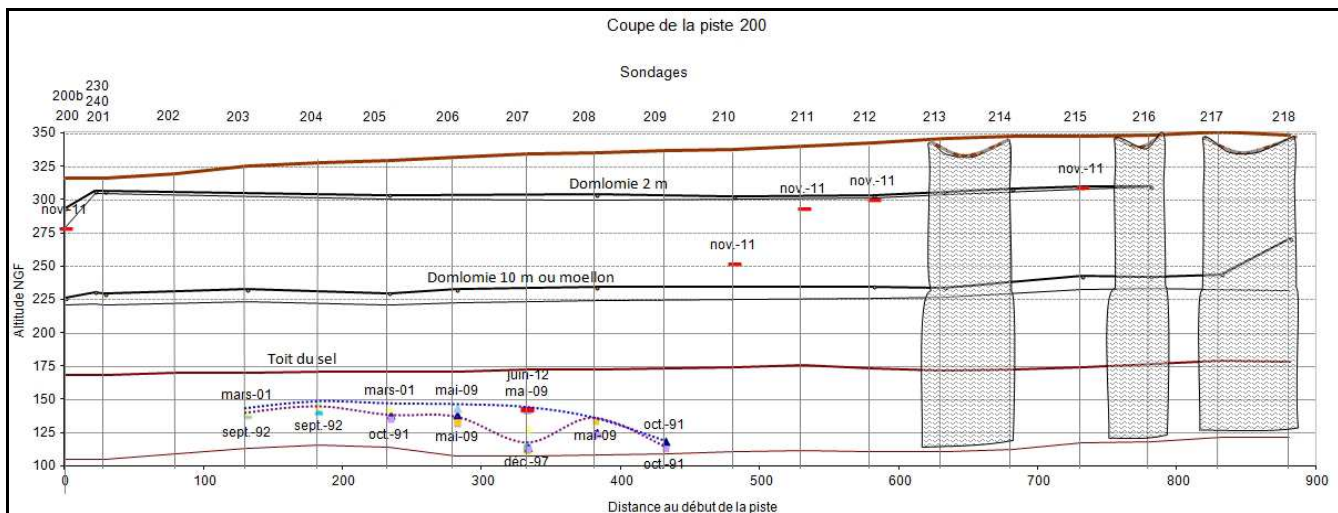
3.2 CARACTÉRISTIQUES DES EXPLOITATIONS

Un travail de synthèse des données d'exploitation a permis d'aboutir à l'établissement d'une base de données de tous les sondages. Toutes les informations disponibles relatives à l'exploitation y sont renseignées (caractéristiques des sondages, niveaux des interfaces géologiques, toit des cavités, mouvements de terrain associés).

Pour les pistes, qui représentent la quasi-totalité de l'exploitation du site de Poligny, des coupes longitudinales ont été réalisées (Annexe 2). Elles positionnent :

- le mur et le toit du gisement de sel ;
- les deux niveaux de dolomie, moellon (ou 10 m) et 2 m ;
- la position du toit de la cavité aux différentes époques de mesure disponibles (de 1991 à 2012 au maximum selon les pistes) ;
- les points d'arrêt dans les casings. Ils signifient que le passage d'instrument de mesure n'a pas été possible au-delà ;
- les sondages effondrés ;
- les tronçons affaissés.

La Figure 13 présente un exemple de coupe longitudinale d'une piste. Toutes les autres coupes longitudinales des pistes exploitées sont présentées en Annexe 2.



*Figure 13 : Exemple de coupe longitudinale d'une piste de Poligny
(les zones grisées correspondent aux effondrements, les marques orange aux points
d'arrêt dans les casings)*

3.3 PÉRIODE « TERVILLE »

L'activité d'exploitation industrielle du sel dans le secteur de Poligny débute à la fin du XIX^{ème} siècle par la recherche de sel gemme puis par son exploitation par dissolution.

Deux sondages ont été réalisés en 1892 et 1893, au lieu-dit « Les pieds cuits », au nord du champ d'exploitation actuel de Poligny, en bordure de l'actuel étang (Figure 10).

Ces deux sondages seront par la suite dénommés Terville 1 et Terville 2. Ils n'auraient reconnu que le premier faisceau de sel sur 21-22 m environ, le toit de la formation salifère se situant entre 124 et 134 m de profondeur à cet endroit.

L'exploitation s'est déroulée de 1895 à 1932 par la méthode dite des sondages isolés avec alimentation d'eau douce naturelle au toit du sel via l'extrados des tubages qui n'étaient pas cimentés au terrain.

La production cumulée de ces deux sondages a été estimée au maximum à 150 kt de sel.

Ces sondages ont été obturés en 1970 à la suite de débordements de saumure et des dégazages. Pour l'un des deux sondages, 40 m³ de coulis de ciment ont été nécessaires pour l'obturer⁶, ce qui témoigne de l'existence d'une cavité résiduelle au toit du sel d'une trentaine de mètres cubes et ceci 40 ans après l'arrêt de son exploitation.

3.4 PÉRIODE D'EXPLOITATION DE LA PISTE 1 (1928-1969)

Cette piste marque le début de l'exploitation du site par la société SOLVAY et la mise en œuvre de la méthode d'exploitation par pistes et sondages.

Auparavant, de 1924 à 1926, six forages de reconnaissance (I à VI) ont été réalisés pour préciser la puissance et la profondeur du gisement sur l'ensemble de la concession (Annexe 7).

L'exploitation de la piste 1 représente, à elle seule, environ la moitié de la production totale du site de Poligny et elle a constitué sur près de 40 ans la seule source d'approvisionnement en sel de l'usine de Tavaux.

Cette piste est la plus longue (près de 2 km) de toutes celles qui seront construites par la suite sur le site avec 45 sondages alignés dont 5 sondages extracteurs (S.A, S.B, S.4, S.5 et S.6).

Elle s'oriente globalement NE-SW. Son extrémité sud-ouest est située à 600-700 m au nord du village de Miéry et les sondages les plus au nord-est se trouvent à proximité des faubourgs de Poligny.

Le schéma global d'exploitation de cette piste s'est établi depuis l'amont pendage à son extrémité sud-ouest vers son aval pendage à son extrémité nord-est. La formation de cette piste a cependant été menée en deux tronçons : d'abord par sa moitié aval à partir de 1929 (sondages 4 à 23) puis par sa moitié amont ensuite, de 1938 jusqu'en 1940 (sondages 24 à 45).

Comme sa formation, l'exploitation de cette piste a été conduite en deux phases. Elle a d'abord débuté à l'aval, jusqu'en 1938, avec l'introduction d'eau douce à partir du sondage 15 (près de 1,5 Mm³). A partir de cette date, l'exploitation a été conduite sur la totalité de la piste à partir du sondage 45.

Il est fait mention dans les écrits que les 15 sondages en aval n'ont pas été exploités après la formation de la piste car ils étaient trop près des zones urbanisées. Des doutes subsistaient sur cette information, à l'aval du sondage 15, étant donné les volumes d'injection pratiqués dans ce dernier⁷. En théorie, ces volumes étaient suffisants pour exploiter totalement le sondage 15 qui n'est cependant pas effondré. Les investigations réalisées en 2016 et synthétisées au paragraphe 5.4 ont mis en évidence une zone de transition entre la piste exploitée et un chenal de communication indiquant bien une part d'exploitation effective à l'aval du sondage 15.

Effondrements de la piste 1

⁶ Le sondage avait 130 m de longueur. Le volume de ce dernier n'excède donc pas 4 m³ (pour 20 cm de diamètre considéré)

⁷ Les données d'exploitation par sondage sont disponibles pour cette piste. En moyenne, chaque sondage exploité a reçu 1,5 Mm³ d'eau douce et a produit 460 000 tonnes de sel

A partir de 1938, l'exploitation a été conduite normalement, c'est-à-dire depuis l'amont de la piste. Logiquement, les effondrements sont ainsi apparus dans l'ordre chronologique de l'exploitation, d'amont en aval de la piste.

Le premier effondrement est survenu en 1943 aux sondages amont 44 et 45. Les effondrements se sont ensuite succédés normalement avec le développement de l'exploitation jusqu'en 1971 aux sondages 20 et 21, l'exploitation de la piste s'étant arrêtée en 1969. En 1997, un dernier effondrement entre les sondages 17 et 18 s'est produit, soit 28 ans après l'arrêt de l'exploitation.

Il en résulte un alignement plus ou moins continu d'effondrements dont les plus bas topographiquement sont en eau de façon permanente (cratères 17-18, 20-21 et aval de la zone effondrée des sondages 32 à 26, Figure 14).



Figure 14 : Vue de la zone des effondrements des sondages S27 et S26 de la piste 1. Au premier plan la structure visible correspond à un sondage (le S28 probablement).

Le niveau d'eau dans les cratères était très bas en juillet 2011

3.5 EXPLOITATION DES PISTES 100, 200 ET 400

A partir de 1960, l'exploitant entreprend la création de trois nouvelles pistes à l'ouest de la piste 1, globalement orientées parallèlement à cette dernière (Figure 10). Elles sont espacées de 120-130 m les unes des autres. La piste 200, qui est la plus proche de la piste 1, en est éloignée de 300 m environ.

Ces pistes vont être progressivement formées et mises en service au cours des années 1960. L'information concernant l'arrêt effectif de l'exploitation de ce groupe de piste n'est pas très précise. Il semble que leur période principale d'exploitation se termine vers la fin des années 1970, les derniers effondrements étant apparus en 1977.

A partir de cette date, seules des injections de saumure non saturée seront pratiquées dans le sondage 207.

La connexion hydraulique de cet ensemble de pistes avec les nouvelles pistes créées par la suite (500, 1500, 2500, 3000, 3500) sera établie en 1987 par la formation d'un chenal (appelé 550) reliant la piste 500 à la piste 400.

Les premiers effondrements de ces pistes sont survenus à partir de 1969 (sondage 181, piste 100) et se sont succédés jusqu'en 1977⁸. Les effondrements les plus aval ont concerné les sondages 413, 163 et 213. Il reste ainsi une dizaine de sondages non effondrés à l'aval de ces trois pistes. Les sondages situés à l'amont de la piste 400 (419 à 423) auraient été exploités par la piste 100 et sont considérés comme épuisés mais non effondrés.

La piste 400 a la particularité de présenter un chenal discontinu à l'aval. Lors de la formation, la connexion entre les sondages 405 et 406 n'a pas pu être établie. Le tronçon constitué des sondages 401 à 405 est donc isolé du reste de la piste. Il s'agit d'une portion de chenal située à la base du sel.

3.6 EXPLOITATION DES NOUVELLES PISTES

Ce groupe dit « des nouvelles pistes » a été mis en service en deux temps : d'abord en 1975 pour la piste 500 puis à partir de 1985 et ensuite au début des années 1990 pour les pistes 1500, 2500, 3000 et 3500. Il y a donc eu un déplacement progressif de l'exploitation de Poligny vers ces nouvelles pistes à partir du milieu des années 1970.

A partir de 1977, le site de Poligny va recevoir de la saumure non saturée d'Etrez (Figure 15). Celle-ci va être injectée d'abord dans la piste 500 puis, à partir de 1990, dans la piste 1500. Cet apport va contribuer à réduire considérablement la part de sel de dissolution du gisement de Poligny. Ainsi le sel dissous de ces nouvelles pistes ne va représenter que 20% de la production total de la mine de sel de Poligny.

Le Tableau 3 et la Figure 16 synthétisent les données de production par pistes consignées dans les tableaux de suivi de l'exploitant pour les 13 dernières années. Durant cette période d'activité, l'exploitation a concerné essentiellement les pistes 3000, 2500 et 1500 jusqu'en 2000, puis les pistes 3500 et 2500 de 2001 à 2007.

L'information concernant les sondages d'injection durant les 4 dernières années est disponible sur ces pistes :

- de mars 2005 à 2006 : sondage 3508 ;
- de mars 2006 à septembre 2006 : sondage 3507 ;
- de septembre 2006 à novembre 2008 : sondage 2505 ;
- de novembre 2008 à janvier 2009 : sondages 2505 et 1502 ;
- à partir de février 2009 : sondage 3009.

La piste 600 a été formée au début des années 1990 puis connectée en 2000-2002 aux autres pistes par un tronçon de 4 forages relié à la piste 500 (appelée liaison 500-600). Mais cette piste ne sera pas véritablement exploitée. Une dérivation de 4 forages, appelée piste 1600, a été formée en 2003 et connectée à la piste 600 sans être non plus exploitée.

⁸ Quelques effondrements ne sont pas datés. Il est fait mention dans la synthèse de 1995 d'un petit effondrement en 1992 vers le sondage 164.

Huit effondrements sont survenus sur ces pistes (500, 1500, 2500, 3000, 3500) de 1996 à 2003. Une vaste zone jugée instable a été délimitée et clôturée, intégrant tous ces effondrements.

3.7 APPORTS DE SAUMURE D'ETREZ

Une donnée essentielle à considérer relativement à l'historique d'exploitation du site de Poligny concerne les apports de saumure provenant des cavités de dissolution de Storengy (anciennement GDF) situées dans la Bresse à Etrez (01).

En effet, à partir de 1974, le Groupement d'Intérêt Economique (GIE) CANSEL-BRESSE composé à 85% par Gaz de France (GDF) et à 15% par SOLVAY est créé.

A partir de 1977, la saumure produite à Etrez (dissolution du sel de l'Oligocène) a été acheminée par saumoduc jusque dans les pistes de Poligny. La saumure produite n'étant concentrée qu'à 270 g/l environ, elle était injectée dans les pistes pour y être complètement saturée.

Ces opérations ont donc contribué à réduire considérablement la dissolution du sel de Poligny en divisant par 4 environ le tonnage de sel extrait et ceci pour une même production à l'usine de Tavaux.

Une part modeste de saumure diluée a été régulièrement injectée dans le sondage 207 durant les dernières années et ceci jusqu'en février 2011.

La Figure 15 présente l'historique complet de la production de sel envoyé à l'usine de Tavaux en précisant la part de sel provenant de Poligny de celle provenant d'Etrez et de Viriat (site stockage d'éthylène en cavité saline situé à proximité d'Etrez).

En 1995, l'apport de sel d'Etrez a été suspendu et la production a été quasi exclusivement assurée par Poligny. Des injections d'eau douce ont donc à nouveau été pratiquées dans les pistes en 1995, 1996, 1997 et pendant une partie de l'année 1998.

De 1999 à 2010, la part de sel fournie à Tavaux en provenance de Poligny va constamment décroître, Storengy étant en mesure de fournir de la saumure saturée à SOLVAY.

En 2009, durant 5 semaines, l'approvisionnement d'Etrez a été suspendu et l'alimentation de l'usine a été assurée à 100% par Poligny.

3.8 PRODUCTION

Le Tableau 3 et la Figure 15 synthétisent l'historique de la production de sel du site de Poligny. On trouvera également le détail des productions de sel pour les périodes d'exploitation les plus récentes en Figure 16.

**Tableau 3 : Historique de production et d'exploitation par piste
(production réelle sel de Poligny)**

(1) : estimation haute basée sur la plus forte année de production de 1914.

(2) : par recoupement des informations, en particulier en intégrant les dates des derniers effondrements des pistes, il apparaît que les pistes 200 et 400 ne devaient plus être exploitées vers la fin des années 1970 avec une exception concernant le sondage 207 qui a reçu régulièrement jusqu'au début de l'année 2011 de la saumure pour resaturation en petite quantité.

Nom piste	Sondages	Extracteurs	Date de fin de foration	Dates de formation	Dates d'exploitation	Production (kt)
<i>Sondages "Terville"</i>	2		1892-1893		1895-1932	150 ⁽¹⁾
<i>Piste 1</i>	40	5	1928-1930	1929-1940	< 1938 - 1969	14 374
<i>Piste 100</i>	30	2	1960-1964	1962-1967	1962- 1972	4456
<i>Piste 200</i>	19 ⁹	3	1965-1967	1965-1969	1965-2011 ⁽²⁾	2708
<i>Piste 400</i>	23	2	1966-1974	1966-1970	1966- <1980 ⁽²⁾	4318
<i>Piste 500</i>	25 ¹⁰	3	1972-1976	1975-1983	1975- 2003	1148
<i>Piste 550</i>	6		1980	1980-1987	1980- < 1997	33
<i>Piste 1500</i>	21		1986	1986-1990	1986- 2009	1032
<i>Piste 600</i>	16 ¹¹		1991-1993	?	1991-2002	234
<i>Piste 2500</i>	16		1991-1997	?	1993-2010	1919
<i>Piste 3000</i>	17		1993-1997	?	1994-2010	933
<i>Piste 3500</i>	8		1997	?	1997-2010	865
<i>Liaison 500-600</i>	4		1999	2000-2002		67
<i>Piste 1600 (1619-1622)</i>	4		1999	2003		1
Total sondages	231	15			Total production	32238

Remarque : Sont comptabilisés les sondages « bis » ayant été reforés pour diverses raisons techniques et qui se situent à quelques mètres seulement du forage initial.

⁹ Avec S.200 bis et S.230

¹⁰ Avec S.500 A

¹¹ Avec S.621 bis

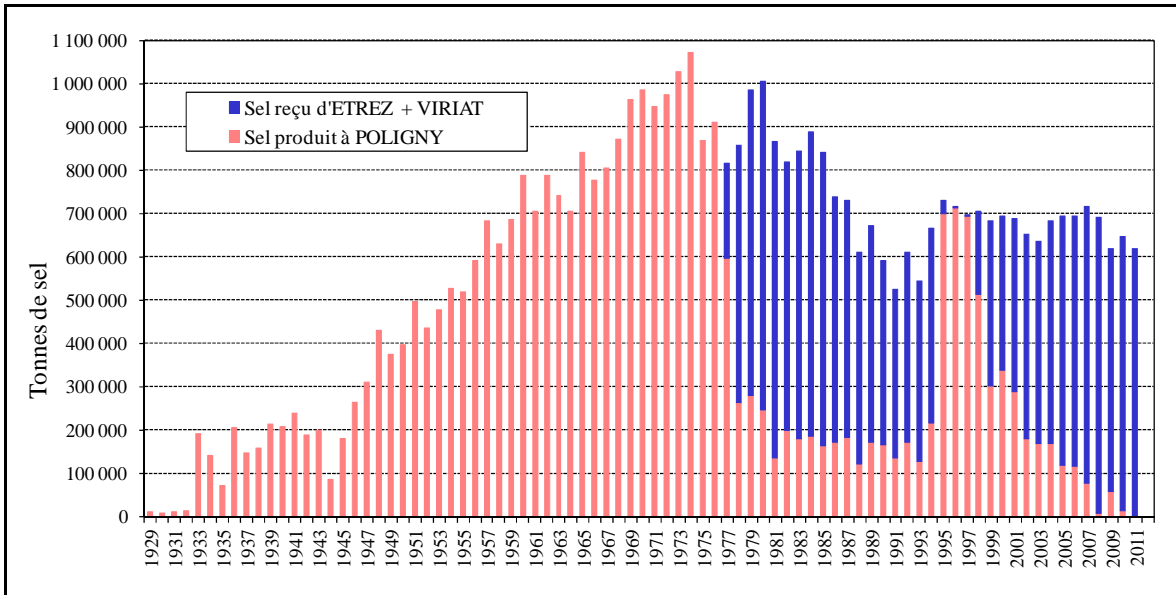


Figure 15 : Production annuelle du site de Poligny (sel envoyé à l'usine de Tavaux)

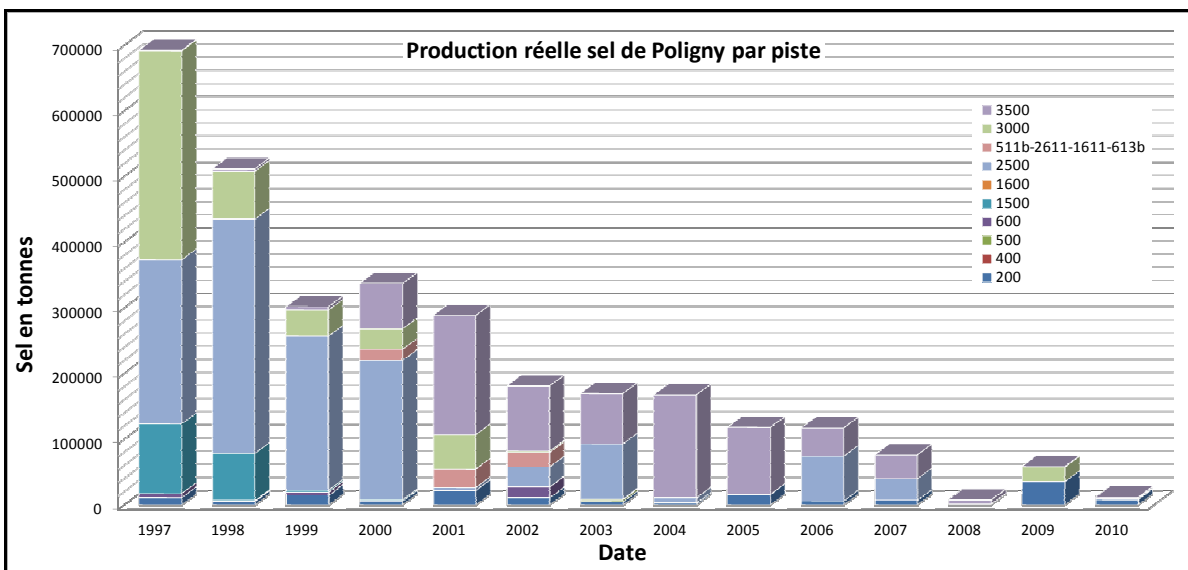


Figure 16 : Production de sel entre 1997 et 2010, par piste, sur le site de Poligny

3.9 ARRÊT DE L'EXPLOITATION

L'exploitation totale du site est interrompue depuis février 2011. A partir de cette date, a débuté une période d'observation post-exploitation (régimes hydrogéologiques, mouvements de terrain) afin de caractériser les conséquences de l'exploitation sur le long terme.

4. INSTALLATIONS DE SURFACE

Des installations de surface liées à l'ancienne exploitation de sel de Poligny sont encore présentes sur le site. Ces installations, identifiées dans le Tableau 4 et en Annexe 3, sont principalement :

- des bâtiments utilisés pendant l'exploitation comme bureaux, ateliers... ;
- des tuyauteries ;
- des bassins de dégazage de la saumure et de confinement de fuites de saumure ;
- des pompes d'extraction ;
- des installations électriques (transformateurs, postes et lignes électriques).

Des photographies en Annexe 3 permettent de visualiser ces différentes installations de surface.

Une partie de ces installations, toujours en service, est propriété de la société INOVYN, installée sur le site de Tavaux. Ces installations de Poligny représentent le point de transfert entre les exploitations d'Etrez/Attignat et l'usine de Tavaux, notamment par la présence de la gare de raclage, de réservoirs de dégazage... Ces installations sont donc à conserver.

Pour le reste des installations (en rouge dans le Tableau 4), elles sont destinées à être démantelées.

Tableau 4 : Installations de surface sur le site de Poligny
(en rouge les installations destinées à être démantelées)

Repère	Description des installations	Propriétaire		Installations	
		SOLVAY	INOVYN	A conserver	A déconstruire
1	Conductivimètre amont de l'ancien bassin de confinement de fuites de saumure de saumure "Pieds cuits"	x		x	
2	Pipe à saumure "Poligny-Tavaux" Gare de raclage		x	x	
3	Ancien bassin de confinement de fuites de saumure "Pieds cuits" - déversoir de vidange	x		x	
4	Ancien bassin de confinement de fuites de saumure "Pieds cuits"	x		x	
5	Bassin de dégazage de la saumure		x	x	
6	Piste 500 -Pompe d'extraction de saumure	x		x	
7	Piste 500 -Transformateur électrique	x		x	
8	Piste 500 -Tuyauterie de refoulement de la pompe d'extraction de saumure	x		x	
9	Conductivimètre amont de l'ancien bassin de confinement de fuites de saumure de saumure "Culaïron"	x		x	
10	Ancien bassin de confinement de fuites de saumure "Culaïron"				
11	Piste 500 - Installation mesure du niveau de la nappe de saumure sur sondage 502	x		x	
12	Bâtiment "Bureaux et atelier"	x			x
13	Bâtiment "Station de l'Orain"		x	x	
14	Pipe à saumure "Etrez-Poligny" Gare de raclage		x	x	
15	Parc à tuyauteries	x			x
16	Alimentation électrique 20kV - Transformateur en béton	x		x	
17	Postes électriques - 3 bâtiments métalliques	x			x
18	Station carburant "véhicules et engins"	x			x
19	Stockage arrière du bâtiment "atelier"	x			x
20	Stockage enterré "fuel" pour chauffage bâtiment	x			x
21	Ancien bassin de confinement de fuites de saumure "Piste 500" -Amont vidange	x		x	
22	Ancien bassin de confinement de fuites de saumure "Piste 500" -Aval vidange (vanne)	x		x	
23	Ancien bassin de confinement de fuites de saumure "Piste 500"	x		x	
24	Ensemble du site - cloture de sécurité	x		x	
25	Ensemble du site - Tête de piézomètre repéré "Amxxx"	x		x	
26	Ensemble du site hors zone d'aléa fort - Tête de sondage d'alimentation	x			x
.....	Ensemble du site hors zone d'aléa fort - Tête de sondage d'alimentation équipée en borne de nivellement	x		x	
27	Piste 600 - Tête de sondage avec équipement de formation	x			x
28	Ensemble du site - présence de tuyauteries posées au sol	x			x
29	Ensemble du site - présence d'anciens massifs et regards	x			x
30	Ligne aérienne 20kV entre transformateur et piste 500	x		x	
31	Ligne enterrée 20kV entre transformateur station de l'Orain	x		x	
32	Réservoirs de dégazage de l'ancien pipe à saumure	x			x
33	Station de l'Orain - Bassin de pompage eau de dilution	x		x	

5. ANALYSE DES MOUVEMENTS DE TERRAIN LIÉS À L'ANCIENNE EXPLOITATION

L'histoire de Poligny est marquée par des mouvements de terrain de deux types :

- les effondrements de la surface du sol, indissociables de la méthode d'exploitation mise en œuvre (pistes effondrables), qui résultent de la rupture du toit des cavités lorsque celles-ci ont atteint leurs dimensions critiques ; ces effondrements forment des cratères de dimensions variables ;
- les affaissements de la surface du sol qui résultent soit de l'évolution des cavités, précédant les effondrements, soit encore de dissolutions au toit du sel, en relation avec l'extension et l'activité de la nappe salée (mise en place à la suite des effondrements qui ont « ouvert » le système hydraulique entre le toit du sel et les masses d'eau douce).

5.1 HISTORIQUE ET ANALYSE DES CAS D'EFFONDREMENT

L'ensemble des données disponibles sur les effondrements a été analysé afin de caractériser les mécanismes et la cinétique de ces mouvements de terrain.

Les caractéristiques connues des effondrements (localisation, dimensions et dates d'apparition) sont présentées en Annexe 4.

Le recensement des effondrements survenus reste imprécis. Une trentaine d'effondrements principaux se sont produits entre 1943 et 2003.

5.1.1 DESCRIPTIF SYNTHÉTIQUE DE L'EFFONDREMENT DE 1943

Un seul descriptif relativement complet et détaillé d'apparition d'un effondrement est disponible dans les archives. Il s'agit paradoxalement du plus ancien, celui des sondages 44 et 45 de la piste 1, survenu en 1943. Il serait délicat de généraliser les conditions d'apparition d'un effondrement uniquement d'après ce cas. Cependant, étant le seul documenté, nous en donnons ci-après un descriptif synthétique suivi de quelques généralités à l'échelle du site.

Ce premier effondrement n'a apparemment pas donné lieu à un phénomène dynamique très brutal. Il s'est mis en place en 2 jours environ. Les premières manifestations semblent avoir été une augmentation brutale du débit de saumure constaté à l'aval de la piste la veille de l'effondrement. Ce phénomène avait déjà été observé un mois avant environ. La veille de l'effondrement, les terrains de surface accusaient un affaissement de 1 m dans l'environnement du sondage 44, résultant de plusieurs semaines d'affaissement progressif.

Le jour de l'effondrement, il est constaté chronologiquement : une résurgence d'eau aux têtes des sondages 44 et 45 (*a priori* de l'eau douce au début), des grondements sourds qui marquent l'arrêt des fuites et l'apparition d'un petit cratère de 5 à 6 m de diamètre pour 10-12 m de profondeur à distance (non connue) du sondage 45, puis d'une cuvette d'affaissement qui va s'accroître en quelques heures. On parle ensuite d'un effondrement dans un rayon de 100 m autour des 2 sondages, recouvert par une nappe d'eau alimentée par une sorte de puissant geyser jaillissant du lac. Au final, il est difficile de connaître les caractéristiques précises de cet effondrement une fois qu'il s'est produit. Un ancien croquis indique une surface abaissée d'une quinzaine de mètres. Des constats ont été faits par

l'exploitant après l'effondrement¹² directement sur les têtes de sondage, indiquant que celles-ci étaient accessibles et donc à nouveau hors d'eau.

5.1.2 CONSTATS D'ÉVOLUTION DES CAVITÉS

Le travail de constitution des profils longitudinaux des pistes, compilant toutes les données diagraphiques à différentes époques et jusqu'à la campagne de 2011-2012, permet de faire les observations suivantes (toutes les coupes sont présentées en Annexe 2) :

- évolution du chenal de dissolution après l'arrêt de l'exploitation. Cette analyse peut être conduite sur les pistes anciennes (100 à 400) dont les données gamma-ray ont été compilées de 1991 à 2011, soit durant une période bien postérieure à l'arrêt de l'exploitation (excepté pour le tronçon de la piste concerné par le sondage 207).

Lorsque le chenal est inclus dans la moitié inférieure du gisement, les diagraphies ne montrent aucune évolution significative du toit des cavités. Les écarts de position du toit de la cavité à différentes époques sont métriques, soit de l'ordre de grandeur des imprécisions liées à l'interprétation des logs.

Sur la base de l'ensemble des observations effectuées, on retiendra que tant que les cavités sont situées sous une poutre de sel en place de 25 m d'épaisseur ou plus, il n'est pas apparu d'évolution significative du toit des cavités au cours des vingt dernières années.

Les dimensions caractéristiques du chenal peuvent être appréciées à partir des quelques résultats diagraphiques qui ont sondé également le fond de la cavité et des quelques mesures sonar (S 159 à S 161 en 1991). On retiendra une hauteur de chenal de 5 à 10 m pour une extension latérale de 40 à 70 m.

- évolution des cavités dans la partie supérieure du gisement. Pour apprécier cette évolution, on s'appuie sur un cas bien documenté¹³ du tronçon 512-514 de la piste 500. En plus du suivi diagraphique, on dispose de deux images sonar réalisées à deux époques différentes, 2007 et 2012. Les observations sont les suivantes :
 - en 1996, il restait respectivement 19 et 13 m de sel au toit des cavités des sondages 512 et 513 (pas de données concernant le sondage 514) ;
 - entre 1996 et 2007, le toit de la cavité va évoluer en plusieurs « saut » de 3 à 8 m chacun (Figure 20). Les mesures étant très rapprochées, à raison d'une mesure ou de deux mesures annuelles, ces remontées sont attribuées plutôt à la rupture successive de bancs de sel qu'à une évolution liée à la dissolution, mais on ne peut être totalement affirmatif, la piste 500 ayant été exploitée jusqu'en 2003. En 2007, les mesures indiquent une planche résiduelle de sel de 2 à 3 m pour ces deux sondages ;

¹² On peut penser qu'ils sont intervenus quelques jours après l'effondrement. Mais cette hypothèse n'a pas pu être vérifiée.

¹³ il s'agit du seul cas bien documenté permettant de faire de l'analyse en retour d'expérience.

- les mesures sonar réalisées en 2007 et 2012 mettent en évidence la rupture du banc de sel résiduel qui subsistait entre le sondage 513 et le sondage 514 sur une hauteur de 12 m.

On peut considérer que pour le tronçon de la piste correspondant aux sondages 512 à 514, les cavités sont maintenant quasiment parvenues au toit du sel. Les mesures sonar indiquent une largeur moyenne de cavité de 50 à 60 m.

Sur la base de cet exemple, on retiendra qu'une évolution de la cavité jusqu'au toit du gisement est possible par rupture de la poutre de sel lorsque celle-ci est inférieure à une vingtaine de mètres.

- évolution de la cavité dans le recouvrement. Plusieurs constats peuvent être faits :
 - aucune cavité franche n'a été identifiée par diagraphie dans les terrains situés au-dessus du sel lors des différentes campagnes réalisées. Les diagraphies ont toutes été stoppées après arrêt de la progression de l'outil dans le casing. Il est supposé que les points d'arrêt des mesures diagraphiques dans les sondages correspondent à des fauchages ou étirements ou déboîtement de tubages révélateurs, *a minima*, de la destructuration des terrains jusqu'à ces niveaux ou encore de la proximité du toit d'une cavité. Les points d'arrêt sont situés à des positions très variables dans le recouvrement mais majoritairement dans la moitié supérieure des terrains qui surmontent le sel, depuis la dolomie de 10 m jusqu'au-dessus de la dolomie de 2 m ;
 - si l'on s'intéresse aux données plus anciennes, quelques observations (en nombre trop restreint cependant pour leur conférer une portée générale fiable) permettent d'apprécier :
 - une évolution des cavités dans le recouvrement de 25 à 40 m avant l'apparition de l'effondrement (respectivement pour les sondages 519 et 1517) ;
 - l'apparition d'un effondrement alors que le toit de la cavité était encore au niveau du toit du sel (sondages 523-524) ;
 - dans les situations précitées, les évolutions jusqu'à l'effondrement sont assez rapides puisqu'elles interviennent au plus 4 ans après les premiers constats d'évolution mais, dans deux cas sur trois, dans l'année qui suit le constat de la position du toit de la cavité au niveau du toit du gisement de sel.

Ces observations amènent plusieurs remarques :

- s'il existait un ou plusieurs bancs suffisamment résistants mécaniquement dans le recouvrement, des situations fréquentes avec des sondages non endommagés débouchant dans des cavités franches devraient se rencontrer encore maintenant, ce qui n'est pas le cas sur l'ensemble des observations faites ;
- au contraire, il ne semble pas qu'il y ait de point de blocage particulier au niveau des deux horizons dolomitiques présents dans l'ensemble des marnes du recouvrement : dolomie de 10 m et celle de 2 m. On notera qu'il

existe peut-être un effet temporaire de ces deux structures, constaté sur la piste 2500 pour la dolomie de 10 m (sur 3 sondages) et sur la piste 200 pour la dolomie de 2 m (pour 2 sondages). La raison principale de l'absence d'effet mécanique prépondérant de ces horizons dolomitiques doit être recherchée dans le contexte très tectonisé de la région de Poligny. Les nombreuses failles identifiées sur le site compartimentent le gisement et il est probable que la dolomie, mécaniquement fragile, soit très fracturée dans ce contexte. *A fortiori*, le banc de dolomie de 2 m, proche de la surface (souvent à moins de 25 m de profondeur), doit être encore moins résistant mécaniquement ;

- il est probable cependant qu'il subsiste de nombreuses situations où des cavités demeurent ouvertes dans le recouvrement. Dans ce cas, les points d'arrêt des observations diagaphiques dans les casings pourraient résulter d'un fléchissement global des terrains sus-jacents, d'autant plus aisé qu'ils sont mécaniquement souples. L'analyse développée au paragraphe suivant tend à corroborer cette hypothèse, au moins pour certaines pistes. Les constats faits sur les sondages 519, 1517 et 523-524 montrent par ailleurs que, quelle que soit la position de la cavité dans le recouvrement, une évolution rapide jusqu'à l'apparition de l'effondrement en surface peut intervenir ;
- on retiendra que les terrains de recouvrement du gisement de sel de Poligny ne possèdent visiblement pas, dans leur ensemble, de compétences mécaniques telles que des cavités ouvertes de grandes dimensions puissent se maintenir dans un état stable sur le long terme. Au contraire, les terrains possèdent apparemment un comportement mécanique globalement souple (ceci sera conforté par l'analyse des affaissements dans les paragraphes ci-après) et les bancs de dolomie ne constituent pas des bancs raides.

5.1.3 RELATION ENTRE LES PRODUCTIONS PAR SONDAGE ET LES EFFONDREMENTS

Afin d'estimer s'il subsiste encore des vides en proportion importante à l'aplomb de chaque piste de Poligny et par conséquent des risques de survenue d'effondrement, une analyse des productions de sel des sondages et des volumes de cavité créés correspondant a été menée. Les résultats de cette analyse sont présentés en Figure 17.

L'analyse a consisté à comparer, pour chaque piste (ou tronçon de piste), un volume moyen des cavités créées par sondage, obtenu à partir des productions des pistes, à un volume théorique de cavité par sondage si tout le gisement est exploité.

Le volume théorique de cavité par sondage pour chaque piste a été calculé en considérant :

- une largeur de cavité déduite des observations de site et en cohérence avec l'épaisseur du gisement. Il a été retenu 80 m pour l'amont de la piste 1 et 60 m pour toutes les autres pistes ;
- dans l'axe de la piste, une extension correspondant à l'entre-axe des sondages, soit 25 m ;

- de ces deux dimensions, un rayon équivalent de cavité a été déterminé pour chaque sondage ;
- le volume théorique moyen est calculé en considérant l'épaisseur moyenne du gisement de la piste.

Le volume moyen par sondage est obtenu en rapportant la production totale de la piste au nombre de sondages considérés effondrés.

Si le rapport entre le volume moyen et le volume théorique est proche de 1, cela signifie que tous les sondages considérés pour le calcul (i.e effondrés) ont été totalement exploités et que la part du volume de cavité encore présente dans la masse de sel dans le reste de la piste est par ailleurs faible. En d'autres termes, cela signifie qu'il n'existe pas de volume de vide important au droit d'autres sondages.

En faisant l'hypothèse que les volumes théoriques ont été correctement estimés, il vient que :

- si le rapport est supérieur à 1, cela signifie que le nombre de sondages considérés pour le calcul du volume moyen par sondage n'est pas suffisant. En d'autres termes, une partie non négligeable du volume des vides créés par dissolution est présent à l'aplomb d'autres sondages considérés non effondrés. Ce volume de vide peut être concentré sur un ou plusieurs sondages ou plus largement réparti sur le reste de la piste non effondrée ;
- si le volume est inférieur à 1, cela signifie que le nombre de sondages effondrés considérés pour le calcul du volume moyen est surestimé. Cette situation ne peut pas a priori être rencontrée.

Précisons, concernant cette approche, qu'il faut bien sûr considérer les tendances et les ordres de grandeurs, les calculs étant entachés de plusieurs sources d'incertitudes concernant notamment le calcul des volumes.

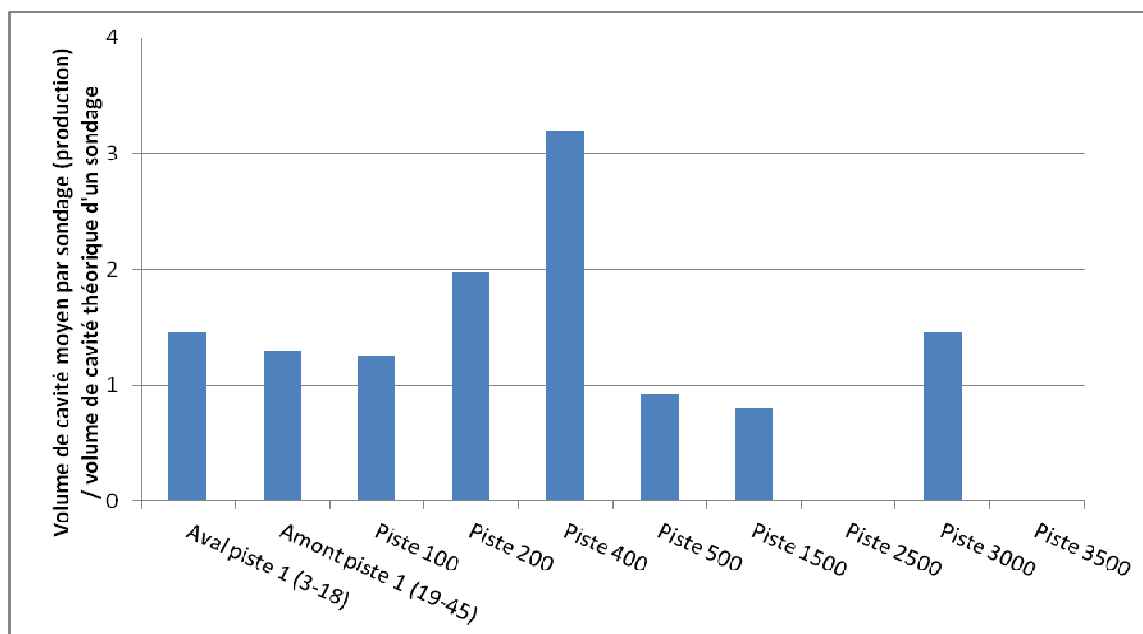


Figure 17 : Estimation de l'importance du volume de cavité non effondré basé sur le rapport des volumes exploités et théoriques

Du graphique de la Figure 17, on retiendra que :

- le rapport est le plus proche de 1 pour les pistes 100, 500, 1500 et l'amont de la piste 1. Pour ces pistes ou tronçon de piste, cela signifie que l'essentiel du volume dissous était localisé à l'aplomb des sondages effondrés et que la part de volume de vide non effondrée est plutôt marginale à l'échelle de la piste considérée ;
- pour l'aval de la piste 1, le rapport est légèrement supérieur à celui de l'amont de cette même piste. Il peut traduire le fait qu'une part non négligeable du volume dissous est présente à l'aplomb des sondages non effondrés. Du fait que ce tronçon de piste est relativement court comparé au tronçon amont, la probabilité d'une concentration du vide sur un ou deux sondages et non sur une portion plus longue de piste apparaît plus grande.
- concernant les pistes 200, 400 et 3000, le rapport des volumes très supérieur à 1 indique clairement qu'il demeure probablement une part importante du volume exploité à l'aplomb de sondages considérés non effondrés. Des situations de sondages totalement exploités mais non effondrés à ce jour, donc à risque d'effondrement sont donc très probables pour ces pistes. Pour conforter cette hypothèse, retenons que la prise en compte dans le calcul des sondages suspectés d'être totalement effondrés (compte tenu de l'historique d'exploitation et des résultats des diagraphies) ramènerait à une valeur proche de 1 le rapport des volumes ;
- pour la piste 3500, qui n'a pas encore connu d'effondrement, on peut estimer que les situations où les cavités sont présentes ou supposées dans le recouvrement correspondent à des situations potentielles d'effondrement.

5.1.4 ANALYSE DE L'AFFAISSEMENT DES TÊTES DE SONDAGE

Une analyse spécifique de l'évolution des têtes de sondage a été menée pour l'ensemble des pistes et comparée à la connaissance de la position des cavités et de leur évolution. L'Annexe 2 présente pour chaque piste exploitée la coupe longitudinale, l'évolution dans le temps de l'affaissement et de la vitesse d'affaissement des têtes de sondage. Nous reprenons ici quelques figures jugées caractéristiques permettant d'illustrer le propos.

Signalons que le suivi de certaines têtes de sondage par nivellement classique a été substitué par des mesures déportées avec visées sur des mires lorsque les conditions de sécurité n'apparaissaient plus réunies pour accéder aux têtes des sondages.

Les points importants qui se dégagent de l'analyse des affaissements des têtes de sondage sont :

- des affaissements mesurables (*i.e.* significatifs) pour tous les sondages des pistes, quels que soient la position et le développement des cavités ;
- des affaissements qui se poursuivent, quelles que soient les pistes, après l'arrêt de l'exploitation mais avec un rythme souvent plus réduit ;

- des différences assez marquées en amplitude et en vitesse d'affaissement selon la position et le développement de la cavité.

Amplitude de l'affaissement :

- pour les pistes anciennes (1 à 400), à l'aplomb des chenaux de dissolution, on retiendra un affaissement cumulé de l'ordre de 5 cm ;
- pour les pistes récentes (500 à 1500), les premiers sondages de la piste 1500 montrent des affaissements de 10 à 25 cm.

Cette différence de comportement est attribuée, à notre sens, au fait que les cavités anciennes sont espacées les unes des autres, sans influence des exploitations voisines. Pour la piste 1500 et, plus généralement pour l'ensemble du groupe des pistes récentes, leur proximité spatiale et le fait qu'elles ont toutes été exploitées à peu près au même moment, doit être de nature à augmenter les interactions mécaniques entre cavités et à diminuer globalement la résistance des terrains encaissants. En l'occurrence, l'aval de la piste 1500 est très proche des pistes 2500, 500 et du tronçon de liaison 550.

- lorsque les cavités se développent dans la masse de sel et jusqu'au toit du sel, les affaissements atteignent une valeur de l'ordre de 30 cm dans la plupart des cas mais jusqu'à 50 cm dans des situations plus rares (cas de la piste 1500 en particulier).
- au-dessus du toit du sel, les corrélations entre la position de la cavité et les affaissements en surface sont plus difficiles à établir car il a y très peu de mesures de la position de la cavité (peu utile pour le suivi de l'exploitation et/ou pour des questions de sécurité). On gardera cependant à l'esprit que les affaissements peuvent atteindre une valeur de l'ordre d'1 m à l'aplomb des sondages présentant des points d'arrêt (*i.e.* pour les mesures diagraphiques) dans le recouvrement et ceci quel que soit le niveau de ces points d'arrêt. Cette valeur de 1 m est souvent atteinte pour le sondage non effondré le plus proche d'un effondrement.
- enfin, il existe quelques situations où des affaissements de plusieurs mètres ont été mesurés avant l'apparition de l'effondrement en surface du sol (sondages des pistes 500, 1500 ou 3000).

Les Figure 18 et Figure 19 illustrent l'évolution de l'affaissement en fonction du temps et de la position de la cavité au droit des pistes 100 et 1500.

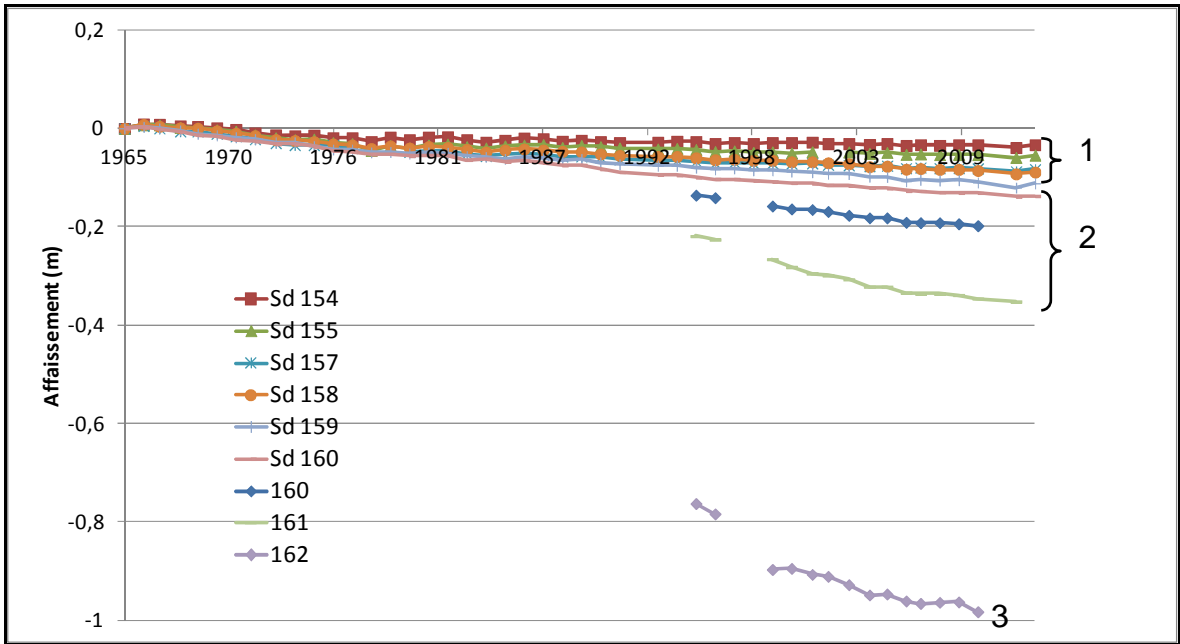


Figure 18 : Illustration de l'affaissement dans le temps des têtes de sondage et en fonction de la position de la cavité
 Cas de la piste 100 : 1) cavités correspondant au chenal, 2) cavités développées dans le sel, 3) cavité dont la diagrapie a été stoppée au niveau de la dolomie 2 m et situé à proximité d'un effondrement

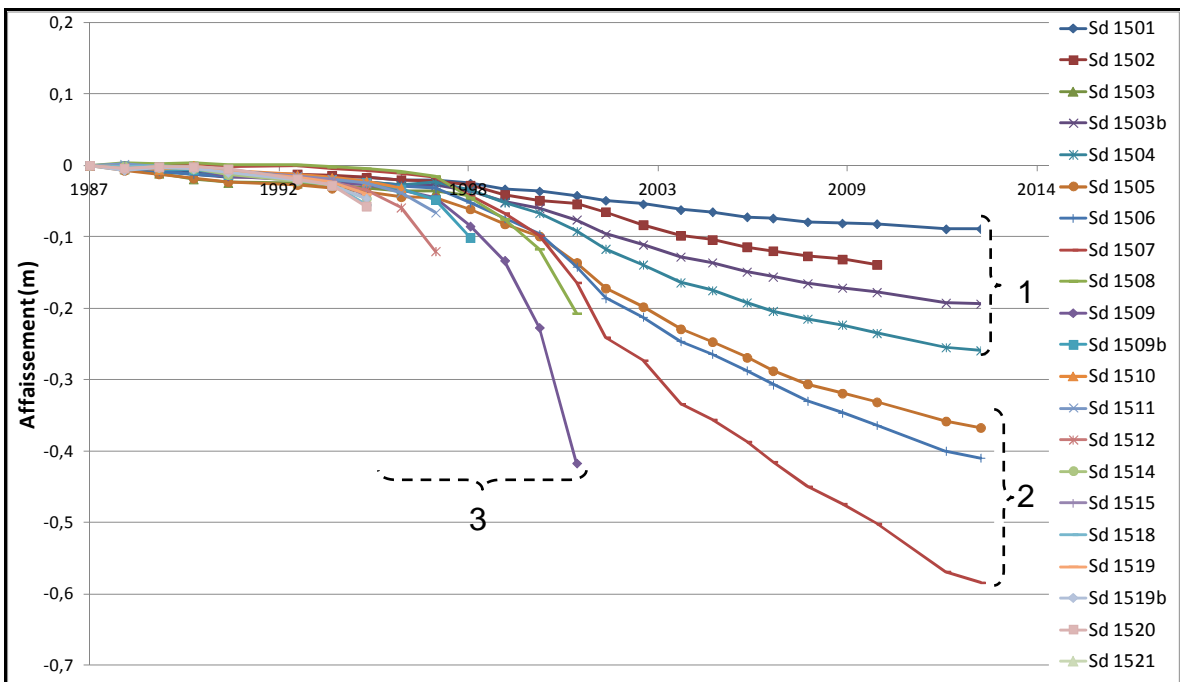


Figure 19 : Illustration de l'affaissement dans le temps des têtes de sondage et en fonction de la position de la cavité
 Cas de la piste 1500 : 1) cavités correspondant au chenal, 2) cavités développées dans le sel, 3) cavités effondrées (mesures stoppées)

La Figure 20 compare l'évolution de l'affaissement des têtes de sondage 512 et 513 avec celle de l'épaisseur de la poutre de sel au droit de ces mêmes sondages. On constate très clairement un changement de rythme des affaissements en relation avec la diminution d'épaisseur de la poutre de sel. Alors que les affaissements étaient relativement faibles, de l'ordre de 5 cm en une vingtaine d'années, lorsque la poutre de sel était épaisse de 17 à 18 m, leur rythme s'est fortement accentué après diminution de l'épaisseur de la poutre de sel. Il s'est établi environ à la valeur de 2 cm/an. L'affaissement cumulé est aujourd'hui de l'ordre de 30 cm.

Cette analyse illustre, à nouveau, le rôle important joué par la poutre de sel au toit de la cavité qui tend à limiter l'amplitude et le rythme des affaissements en surface du sol. Ici le changement de rythme est net et lié soit à la rupture en une ou deux fois de la planche de sel au toit ou à la dissolution. Comme évoqué précédemment, nous attribuons ces remontées à la rupture de la poutre de sel.

Il n'existe pas d'autres exemples aussi bien documentés pour les pistes de Poligny. Cela dit, il faut retenir avec cet exemple que la présence d'une planche de sel au toit, d'épaisseur suffisante, est de nature, dans le contexte de Poligny, à limiter sans pour autant empêcher les affaissements de la surface du sol.

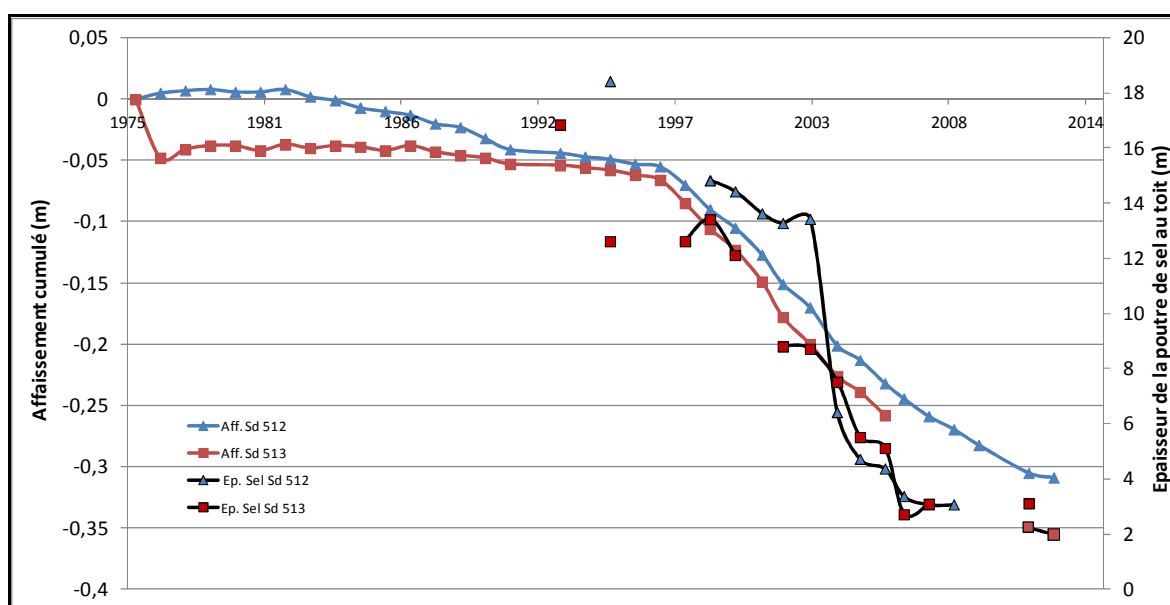


Figure 20 : Comparaison de l'évolution de l'affaissement et de l'épaisseur de la poutre de sel au toit de la cavité. Cas des sondages 512 et 513

Vitesse de l'affaissement :

Les Figure 21 et Figure 22 présentent deux exemples d'évolution de la vitesse des affaissements en fonction du temps. On se reportera également à l'Annexe 2 afin d'apprécier les tendances générales qui semblent se dégager :

- une augmentation assez régulière de la vitesse d'affaissement au-delà de 2 cm/an conduit dans la quasi-totalité des cas à l'apparition d'un effondrement en surface du sol (Figure 22) ;
- le seuil de 2 cm/an par an doit être considéré comme un seuil de vigilance :

- pour les pistes anciennes, il est régulièrement atteint lorsque le sondage est soit situé à proximité d'un effondrement, soit affecté par des désordres dans le casing (déduit des arrêts de diagraphie). Dans les deux cas il est supposé que le toit de la cavité a au moins atteint le toit du sel ou se trouve déjà au-dessus ;
- pour les pistes récentes, le constat est globalement le même. Les situations où ce seuil est dépassé correspondent dans la plupart des cas à la présence d'une cavité au toit du sel ou au-dessus du toit du sel (avéré ou déduit des diagraphies) ou encore à la proximité d'une zone effondrée. Le cas de la piste 1500 demeure atypique car de telles vitesses sont acquises alors que les cavités sont encore dans la masse de sel. Comme évoqué précédemment, l'effet des pistes voisines sur le comportement mécanique des terrains de recouvrement doit être pris en compte. De ce fait le seuil de vigilance retenu nous semble utile à considérer également pour cette piste.

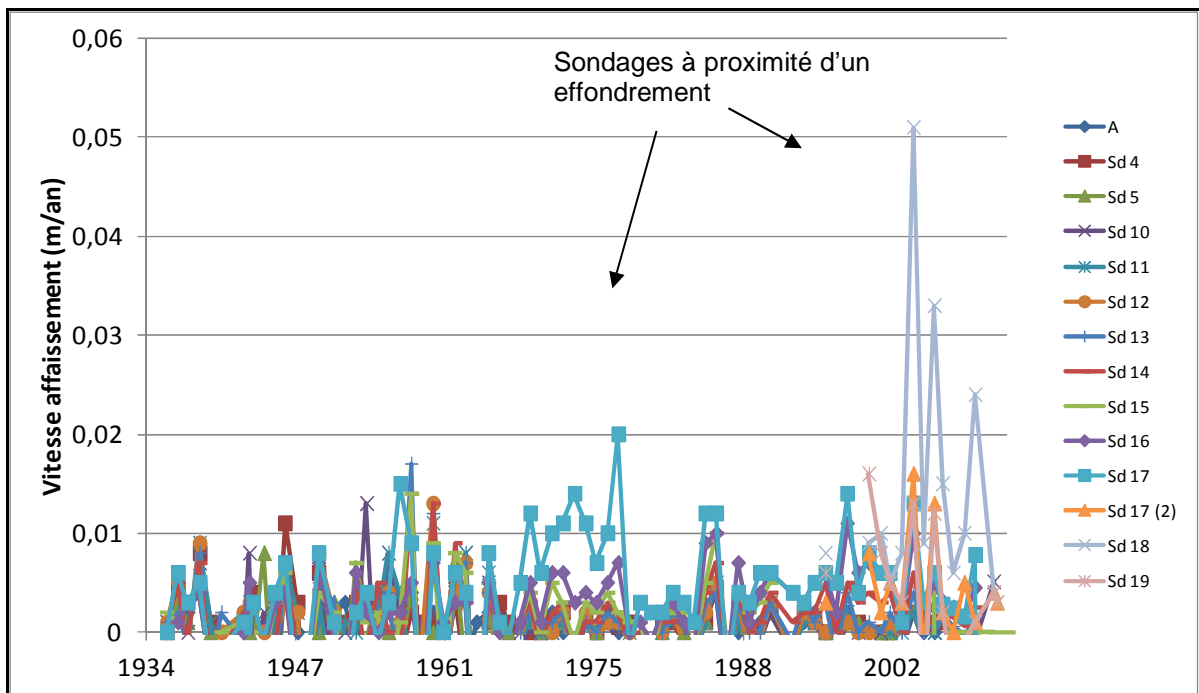


Figure 21 : Illustration de l'évolution de la vitesse d'affaissement au cours du temps. Cas de l'aval de la piste 1

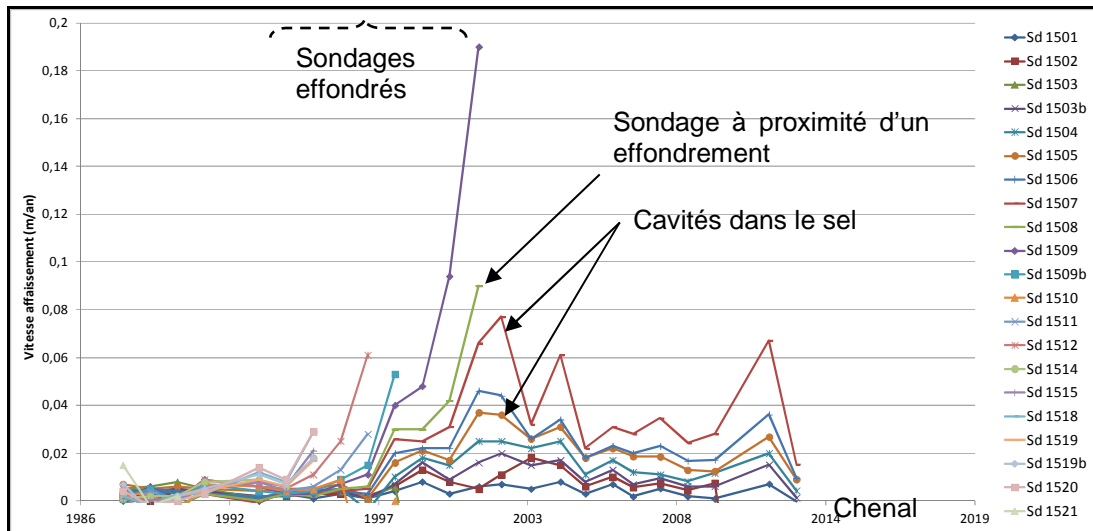


Figure 22 : Illustration de l'évolution de la vitesse d'affaissement au cours du temps. Cas de l'aval de la piste 1500

Afin de trouver un critère supplémentaire de vigilance vis-à-vis de l'évolution des cavités et du risque d'effondrement, la Figure 23 met en relation la vitesse d'affaissement moyenne sur les dix dernières années avec l'affaissement maximal et une indication sur la cavité (position avérée ou supposée ou effondrée). S'il semble s'établir une relation entre l'affaissement maximal et la vitesse d'affaissement moyenne lorsque la cavité est encore dans le sel, il n'est pas possible de dégager une tendance nette pour les autres cas, notamment pour les cas d'effondrement. Les données concernant ces derniers cas sont en général assez peu nombreuses, souvent arrêtées très rapidement. Ce critère ne peut donc pas être généralisé à l'ensemble des situations rencontrées et ne sera pas retenu comme critère de vigilance pour l'ensemble du site.

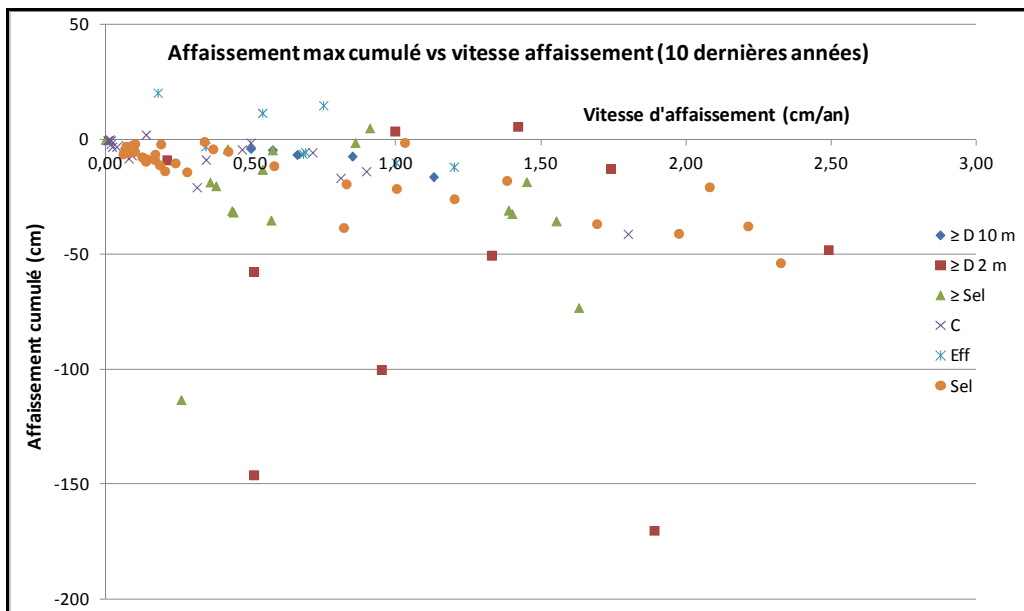


Figure 23 : Relation entre la vitesse d'affaissement (moyenne sur les 10 dernières années de mesure), l'affaissement maximal et la position avérée ou supposée de la cavité (C : chenal, Eff : cavité effondrée, Sel : dans la masse de sel, \geq Sel : au toit ou au-dessus du sel, $\geq D 10 m$: au toit ou au-dessus de la dolomie 10 m, $\geq D 2 m$ au toit ou au-dessus de la dolomie 2 m)

5.1.5 CARACTÉRISTIQUES DES EFFONDREMENTS

Dans une optique de cartographie des zones d'aléa effondrement et du risque associé, il est nécessaire de caractériser l'extension en surface de ces types de mouvement de terrain.

Une analyse poussée des données disponibles permet de mettre en avant trois paramètres principaux :

- l'épaisseur du gisement de sel. Si l'on se réfère à la Figure 24, on constate une corrélation, sans qu'elle soit très forte, entre l'épaisseur du gisement au droit des effondrements et le rayon équivalent de ces derniers (calculé à partir des deux dimensions principales des cratères dans leur situation actuelle). Ce paramètre contribue au volume et à l'extension des cavités. Plus le gisement est épais, plus le rôle mécanique du sel au toit a de l'importance¹⁴ dans un contexte où le caractère globalement souple des terrains de recouvrement du gisement est avéré. Donc plus, le gisement est épais, plus les cavités peuvent être de grandes dimensions. Le volume total étant de fait aussi lié à l'épaisseur du gisement, il est donc logique de trouver une corrélation entre l'épaisseur du gisement et l'extension des effondrements. Le fait que l'amont de la piste 1 soit le secteur où le gisement est le plus épais (70 à 80 m) et que les effondrements soient les plus continus et de grande dimension semble valider l'importance de ce paramètre.

Cette relation n'étant cependant pas très forte pour le reste du site de Poligny, d'autres paramètres doivent donc entrer également en ligne de compte ;

- le contexte tectonique et la résistance mécanique en grand des terrains de recouvrement du gisement. Globalement, il a été montré que la résistance des terrains de recouvrement était faible en l'absence de banc mécaniquement très résistant. Ceci est dû au contexte tectonique qui a fragilisé notamment le banc de dolomie de 10 m et, plus globalement, l'ensemble des terrains. Il est probable cependant que cette fragilisation ne soit pas homogène sur l'ensemble du domaine exploité. Des contrastes de comportement mécanique liés à la proximité des accidents tectoniques peuvent ainsi jouer un rôle important et expliquer, au moins en partie, les disparités dans les dimensions de cavités avant ou après leur effondrement. Pour les mêmes raisons, pour certains tronçons de piste, les terrains peuvent être localement plus résistants sur le plan mécanique et maintenir encore ouverte des cavités ;
- les conditions d'exploitation des pistes. Ce dernier point est assez délicat à évaluer. La proximité de plusieurs pistes a dû complexifier l'exploitation avec l'établissement de connexions parasites entre pistes rendant difficile la maîtrise des circulations et donc des dissolutions. Il est possible que des tronçons de piste soient moins exploités, voire que des piliers de sel soient restés localement en place, expliquant ainsi, en partie, le caractère discontinu des effondrements.

¹⁴ Rappelons que l'on se situe dans le contexte de l'exploitation par piste qui exploite le gisement de bas en haut.

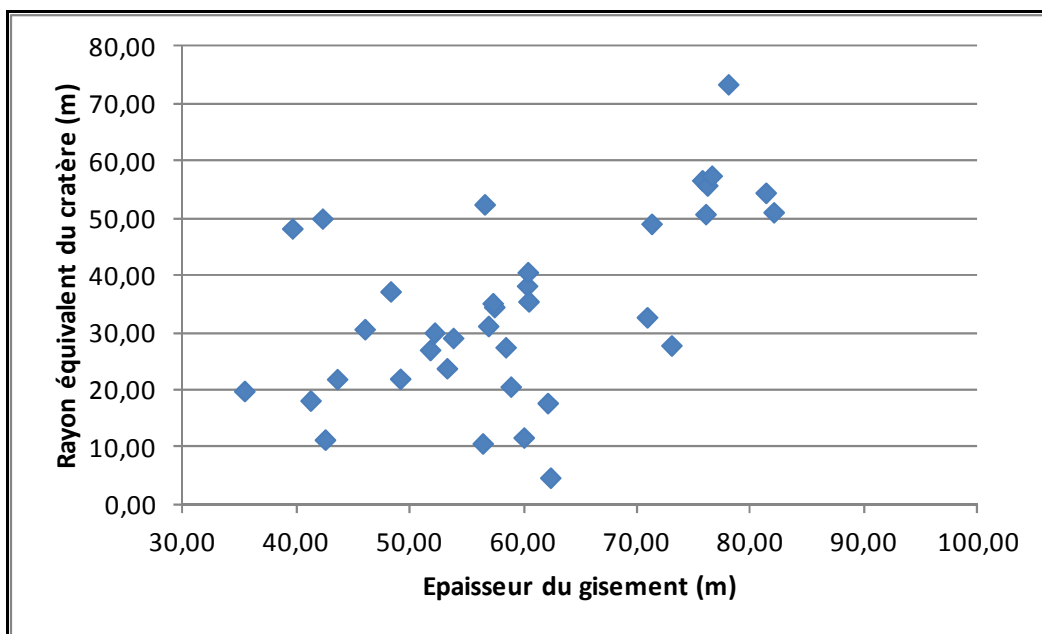


Figure 24 : Relation entre l'épaisseur du gisement et le rayon équivalent du cratère (dimensions stabilisées actuelles)

Extensions latérales des phénomènes d'effondrement :

Pour apprécier les extensions latérales des effondrements et leur évolution dans le temps, nous nous sommes appuyés sur les photos aériennes à différentes époques. Les figures suivantes et la Figure 24, complétées de celles présentées en Annexe 4, illustrent les résultats principaux.

Cas de la piste 1

Rappelons que le récit de l'effondrement des deux premiers sondages de la piste survenu en 1947 indiquait qu'un cratère de 100 m de diamètre s'était formé deux jours après les premiers signes d'effondrement (mises en pression et résurgences de saumure).

La photographie aérienne prise 3 ans après les effondrements des sondages 39 à 42 indique la formation de cônes d'effondrement dont la largeur est de l'ordre de 120 m (Figure 25).

Ces dimensions sont confirmées pour les effondrements ultérieurs, situés à l'aval de la piste (tronçon 30-36) (Figure 26). Dans ce secteur, l'analyse de photographies aériennes successives permet de mettre en évidence la mise en place de grands glissements sur le flanc sud-est de cette zone effondrée. Quatre années après l'effondrement du sondage 32, en 1964, les glissements s'étendent jusqu'à une centaine de mètres de l'axe de la piste. Aujourd'hui, cette zone de glissement n'est plus visible dans le paysage complètement boisé de ce secteur (Annexe 4). Cet effet ne semble pas s'être reproduit sur le reste du tronçon de la piste 1. Il est attribué à la pente du terrain naturel, plus forte à cet endroit (en direction du sud-est), les terrains étant constitués uniquement de marnes.

A l'aval, les deux cratères les plus récents sont isolés du reste du secteur effondré. Sur la photographie aérienne de 1998, l'évolution de leur contour a été estimée grâce aux photographies plus anciennes. Dans ce secteur, où la topographie est globalement horizontale, on constate que les contours initiaux ont très peu évolué en 10 et plus de 30 ans, respectivement pour le cratère des sondages 20-21 et celui situé entre les sondages 17 et 18.

La date de ce dernier effondrement n'était pas bien connue jusqu'alors. Nous savons maintenant grâce aux photographies aériennes qu'il est apparu en 1997 ou avant la campagne de vues aériennes de 1998. Cette date doit être gardée à l'esprit sachant que l'exploitation de la piste 1 s'est arrêtée à la fin des années 1960.

Pour les autres pistes

Comme déjà évoqué précédemment, les dimensions des cratères sont très variables et il semble difficile de retenir des dimensions caractéristiques par pistes. On fait cependant deux remarques :

- au vu de l'analyse comparée des photographies aériennes, les cratères apparus dans le secteur des pistes anciennes ont relativement peu évolué à l'instar de ceux de l'aval de la piste 1 (Annexe 4) ;
- pour les pistes récentes, les effondrements sont plutôt récents (années 1990) et l'on manque un peu de recul et d'observations (à cause du couvert végétal notamment). Compte tenu de la faible épaisseur du gisement comparé au secteur de la piste 1 (quasiment moitié moins par endroit), on pourrait s'attendre à des effondrements de moindre dimension. Pour certains, leur extension est cependant assez comparable à ceux des anciennes pistes (hors piste 1). Dans la partie amont de ces pistes où la topographie est bien plus marquée, un effet supplémentaire de glissement des pentes des cratères peut ainsi s'ajouter et conférer aux cratères des dimensions finales plus importantes.

A noter enfin que certains effondrements ne sont pas centrés sur l'axe des pistes et des sondages (exemple des sondages 413, 166-165, 519). Cet écart est attribué à des dissolutions excentrées en relation probablement avec les hétérogénéités du gisement, notamment de son pendage et du contexte structural. Le déport (distance entre le sondage et le centre du cratère) est de l'ordre de 20 m en moyenne mais peut atteindre 40 m (cratère 413).

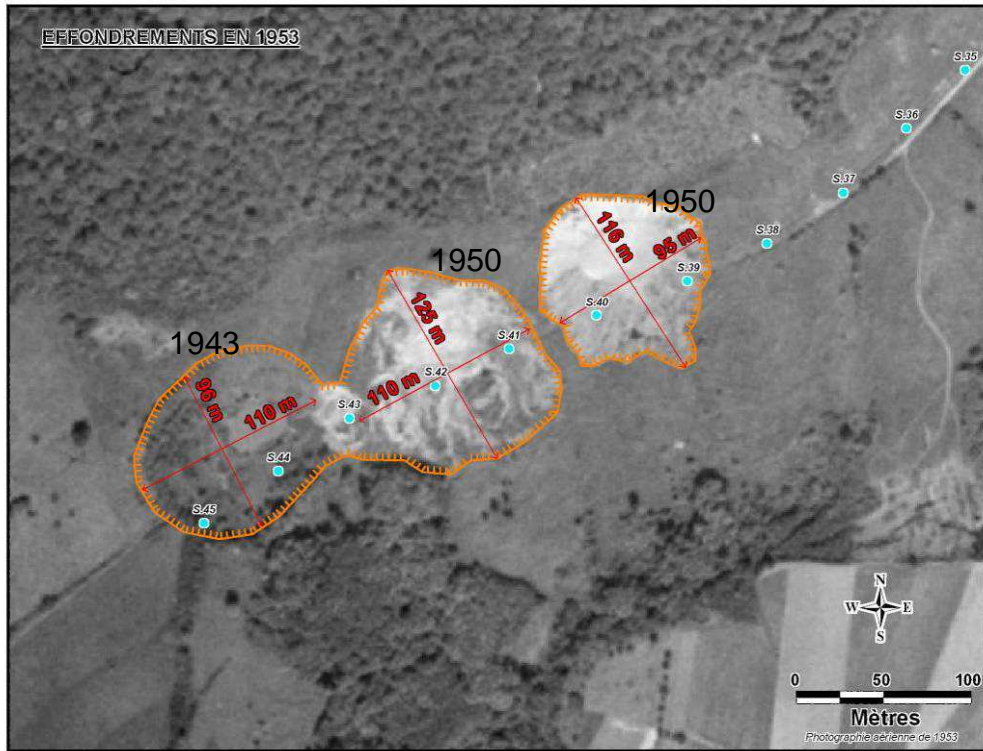


Figure 25 : Dimensions des cratères de la piste 1 amont observées sur la photographie aérienne de 1953



Figure 26 : Evolution des dimensions des cratères de l'amont de la piste 1 observées sur les photographies aériennes de 1962 et 1964

5.2 HISTORIQUE ET ANALYSE DES AFFAISSEMENTS

L'analyse menée dans ce paragraphe concerne les affaissements associés à la dissolution au toit du gisement de sel qu'il convient de séparer de ceux liés à l'évolution des cavités de dissolution dans la masse de sel, point qui a été discuté dans les paragraphes précédents.

Un système de dissolution en amont pendage entraînant des affaissements de terrain s'est développé à la suite des premiers effondrements, depuis l'amont des pistes, en direction et jusque sous la partie nord du village de Miéry. Il s'agit d'un système qui était influencé par l'exploitation et dont l'activité s'est fortement réduite après l'arrêt de la dissolution. Progressivement, avec le développement de l'exploitation, les affaissements se sont étendus en liaison avec l'extension de la nappe salée qui a pris place au toit du gisement de sel. Dans tous les cas, l'effet de développement de la dissolution et des affaissements induits en direction de l'amont pendage du gisement a été mis en évidence. Il est discuté spécifiquement au paragraphe 5.2.4.

Le fait de disposer d'un réseau de nivellement dense, très ancien (depuis 1934) pour partie, suivi quasi annuellement depuis des décennies par l'exploitant, constitue un point très positif qui a permis de comprendre et de suivre l'évolution du site dans sa globalité. Dans ce type de contexte, les données de nivellement sont les plus intégrantes puisqu'elles prennent en compte le mouvement de la surface du sol et renseignent sur l'évolution des dissolutions dans le temps et dans l'espace.

Des cartes d'affaissements sont présentées en Annexe 5. Elles représentent les iso-valeurs de l'affaissement cumulé pour plusieurs périodes caractéristiques de l'exploitation et après l'arrêt de celle-ci :

- entre 1972 et 1976 ;
- entre 1977 et 1981 ;
- entre 1995 et 2000 ;
- entre 2006 et 2010 ;
- entre 2012 et 2016 ;
- entre 2014 et 2016 ;
- entre 1934 et 2016.

Les iso-valeurs d'affaissement ont été obtenues en ne tenant compte que des bornes mesurées sur l'ensemble de la période considérée. Pour chaque carte, la valeur basse représentative des affaissements a été limitée à 1 cm. Deux cartes sont produites pour chaque période, l'une intégrant les mesures effectuées sur les têtes des sondages et l'autre sans en tenir compte. Cela permet d'apprécier en partie la part d'affaissement liée aux cavités de dissolution de celle liée à la nappe salée.

Les deux premières représentations ont été sélectionnées pour encadrer la date de 1977 qui correspond au changement radical de régime de dissolution avec la resaturation de la saumure d'Étrez et l'arrêt d'injection d'eau douce pour dissoudre le gisement.

La période 2006-2010 permet de constater les évolutions récentes de l'affaissement avant l'arrêt complet de toute opération d'exploitation sur le site en

février 2011. La période de 2012-2016¹⁵ correspond à la même durée d'observation mais juste après l'arrêt de l'exploitation.

La période 2014-2016 restitue les affaissements mesurés lors des deux dernières années d'observation.

Enfin, la représentation entre 1934 et 2016 permet de visualiser l'ensemble des affaissements constatés en cumulé partout où des mesures d'affaissement ont été réalisées et ceci en considérant toutes les bornes indépendamment de leur date de mise en place. Aux artefacts de mesure près, elle permet d'établir le contour maximum de la nappe salée (Figure 9).

Nous avons complété les représentations sur les affaissements par des graphiques d'évolution dans le temps de quelques bornes sélectionnées comme représentatives de secteurs de l'exploitation de Poligny ou de son environnement (Annexe 5). Il s'agit :

- de bornes de l'amont de la piste 100 - Grange Moussard ;
- de bornes du secteur de Miéry - Savoye ;
- de bornes du secteur de Savoye ;
- de bornes des nouvelles pistes.

5.2.1 EVOLUTION SPATIALE TOUTES ÉPOQUES CONFONDUES

A partir des cartes des affaissements, les grandes tendances qui se dégagent sont les suivantes :

- les affaissements se sont développés dans les secteurs exploités des pistes, là où les effondrements se sont produits et en relation avec l'extension de la nappe salée (voir le contour de la Figure 9 qui représente également l'extension maximale des affaissements toutes époques confondues) ;
- les secteurs aval des pistes, là où seuls les chenaux de communication sont présents, ne montrent pas d'affaissements significatifs. Ceci est valable également pour l'aval de la piste 1 dont les derniers sondages sont proches des faubourgs de Poligny. Les affaissements constatés récemment dans l'environnement du sondage 8 sont à dissocier *a priori* de l'exploitation. Ils sont analysés dans la partie descriptive des investigations réalisées sur l'aval de la piste 1 (voir §5.4) ;
- à l'est du domaine, latéralement par rapport à la piste 1, les affaissements semblent n'avoir jamais atteint la route D 259 qui relie Poligny à Miéry ;
- l'évolution spatiale la plus importante concerne l'amont des pistes et en particulier celui des pistes 1 et 100. Les affaissements se sont développés au-delà de la route D194, non loin de la Grange Moussard, à l'amont de la piste 100 et jusqu'aux premières maisons situées au nord de Miéry, à l'amont de la piste 1. Nous reviendrons un peu plus loin sur ce fonctionnement à l'amont pendage des pistes.

¹⁵ Le nivellement de 2011 n'ayant concerné que quelques bornes, la période 2012-2016 a été retenue.

5.2.2 AMPLITUDE DES AFFAISSEMENTS

Des affaissements de plusieurs mètres ont été mesurés dans l'environnement proche des pistes (jusqu'à 9 m à l'amont immédiat de la piste 1 et 5 m à l'amont de la piste 100). Ces valeurs (et les iso-valeurs correspondantes) intègrent en fait l'affaissement des pistes elles-mêmes et probablement parfois des effondrements peu profonds ainsi que les effets de pente (glissements) associés dans le pourtour des zones effondrées.

En dehors des zones précitées, là où la nappe salée est présente, c'est-à-dire entre les pistes ou encore à l'amont des pistes vers et à Miéry, l'amplitude caractéristique des affaissements cumulés sur plusieurs dizaines d'années (une vingtaine d'années dans le secteur des nouvelles pistes et plus de 60 ans l'amont de la piste 1) est plus faible, de l'ordre du mètre. En se rapprochant des pistes, à l'amont, les affaissements peuvent atteindre 2 à 3 m avec, cependant, un effet lié à la proximité des zones effondrées.

5.2.3 EVOLUTION DANS LE TEMPS

Plusieurs périodes sont distinguées :

- **avant 1977** : seules la piste 1 et les anciennes pistes (100 à 400) étaient exploitées. Les affaissements avaient acquis un rythme régulier dont la vitesse variait en fonction de la proximité des pistes :
 - 15 à 30 cm/an à l'amont de la piste 100 et dans le secteur de la Grange Moussard,
 - 7 à 10 cm/an dans le secteur de Savoye-Miéry.
- **après 1977** : l'effet de l'apport de la saumure d'Étrez et de la diminution par 4 de la dissolution est spectaculaire et général sur l'ensemble des zones qui s'affaissaient jusqu'alors :
 - le rythme des affaissements s'établit ensuite à 2 cm/an environ pour les mêmes points d'observation du secteur amont de la piste 100 ;
 - l'affaissement suit un rythme de 1 cm/an environ dans le secteur Savoye-Miéry.

Cette diminution très significative généralisée, en réponse à un changement de rythme de l'exploitation, révèle une fois de plus le caractère hydrauliquement connecté de l'ensemble constitué par les pistes en exploitation et par la nappe salée qui s'étend jusqu'à Miéry.

- **reprise de l'exploitation 100% Poligny de 1995 à 1998** : Durant cette période, une reprise de l'exploitation est pratiquée sans apport de saumure d'Étrez. Il est intéressant de constater que cette reprise a pour effet de réactiver l'affaissement dans le secteur amont de la piste 100, comme à Miéry. L'évolution de l'affaissement dans ce dernier secteur et durant cette période est illustrée par la Figure 27. On constate en fait que seule est « réactivée » la borne située au centre de la cuvette d'affaissement développée depuis le début du phénomène d'affaissement à Miéry. Les deux autres bornes, l'une située en bordure de la cuvette au nord-est, en direction du site de Poligny et l'autre dans le secteur de Savoye, ne

montrent pas d'évolution du rythme des affaissements. Ce constat est discuté dans l'analyse du fonctionnement de Miéry ci-après.

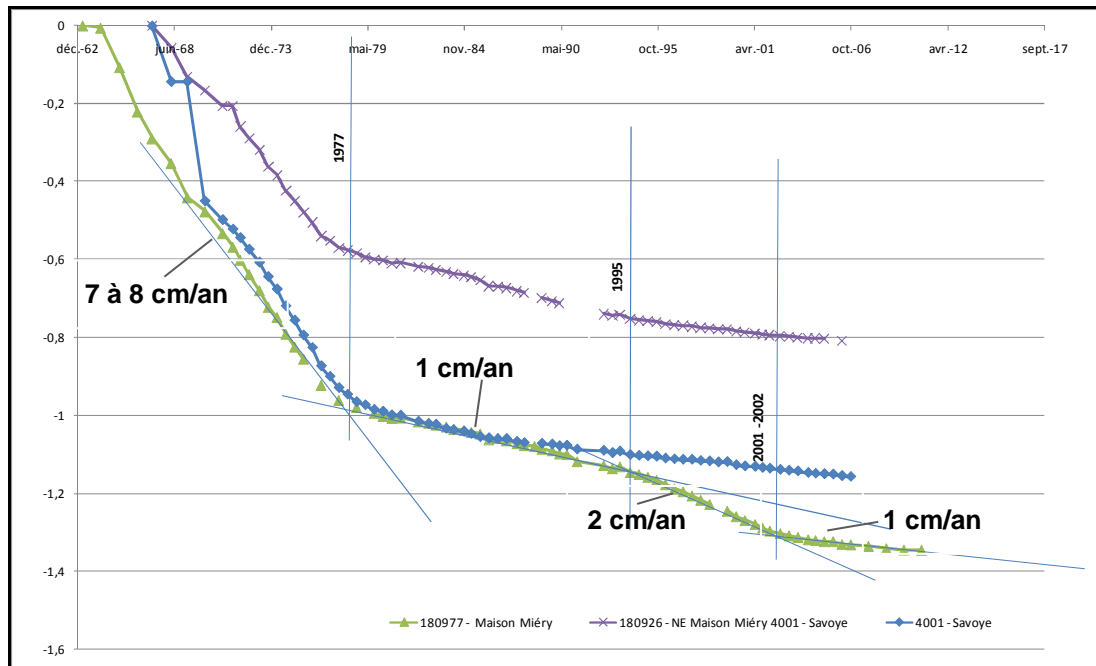


Figure 27 : Evolution comparée des affaissements à Miéry et à Savoye

- **2006-2010** : le rythme et l'extension des affaissements dans l'environnement des pistes avant l'arrêt de l'exploitation en février 2011 est illustré par la Figure 28. Durant cette dernière période d'observation, il est constaté que :
 - les affaissements apparaissent stabilisés dans l'environnement immédiat de la piste 1 et dans celui d'une partie des anciennes pistes ;
 - les secteurs encore actifs concernent :
 - les zones les plus récemment exploitées, à l'aval des « nouvelles » pistes. Pour celles-ci, une part d'affaissement est due au réajustement des terrains lié aux dernières zones effondrées ;
 - l'amont pendage de la piste 100 en direction de la D194 (secteur Grange Moussard) ;
 - la zone historique des mouvements à Miéry qui marque une grande constance spatiale et dans le temps. Le rythme des affaissements est inférieur à 0,5 cm/an. Il est à noter comme point remarquable qu'il ne semble plus y avoir de continuité franche des affaissements entre cette zone et la zone des pistes ;
 - une dernière zone, au nord-ouest de la route reliant Poligny à Miéry, semble avoir bougé au même rythme qu'à Miéry. Ce mouvement qui ne concerne qu'une borne est attribué à des mouvements superficiels liés à la pente prononcée dans ce secteur.

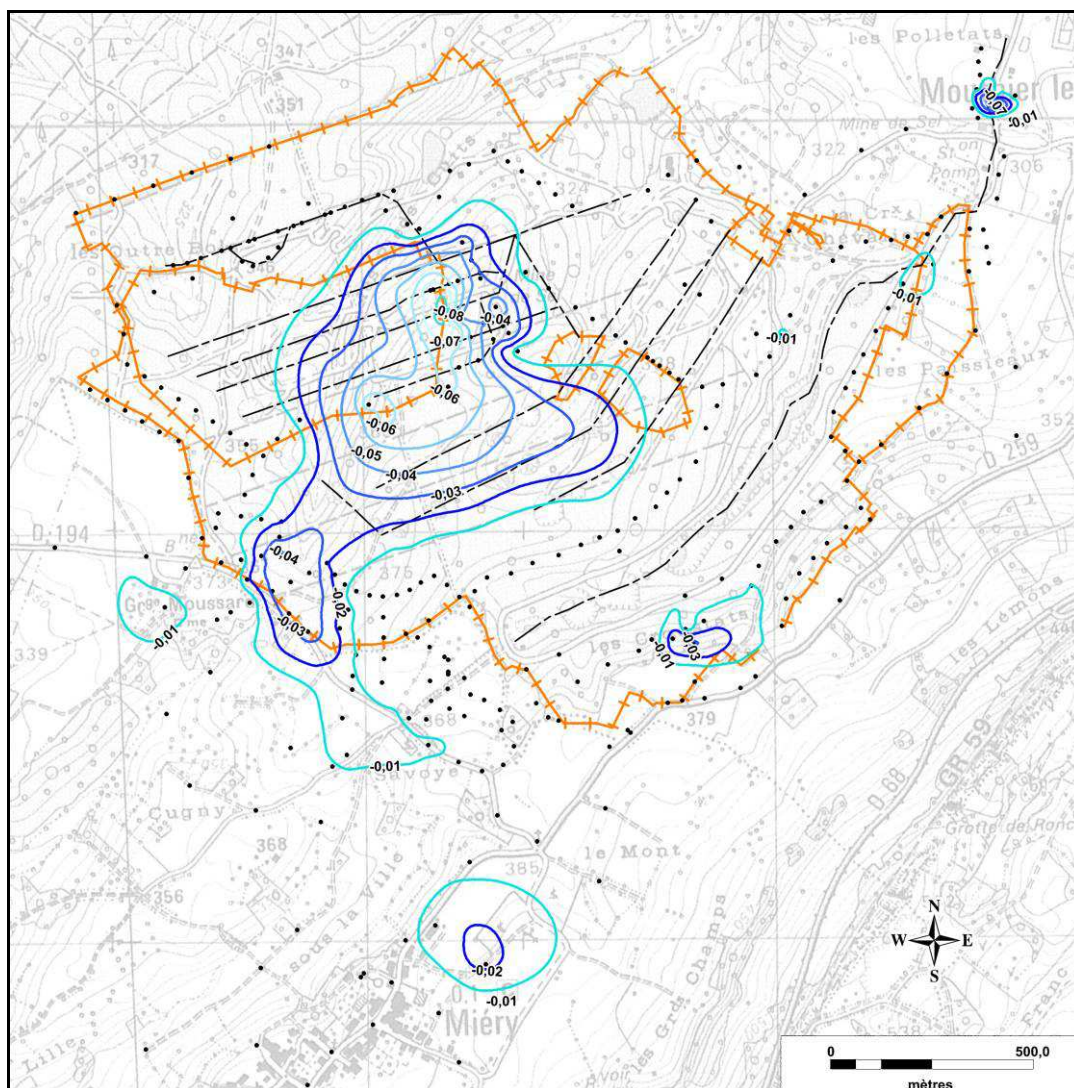


Figure 28 : Iso-valeurs de l'affaissement (en m) dans l'environnement des pistes de Poligny durant la période 2006-2010

- **Rythme actuel (post exploitation) :**

Les observations principales sont les suivantes :

- les affaissements les plus importants sont situés au centre de la zone des nouvelles pistes. Dans ce secteur, l'effet lié aux cavités reste sensible et peut-être prépondérant. Il demeure difficile de dissocier clairement ici la part d'affaissement stricte liée à la nappe salée et donc à la dissolution au toit. Toutefois, il est clair que l'essentiel de l'activité de dissolution de la nappe salée est localisé dans l'environnement des derniers secteurs exploités et effondrés du site du Poligny ;
- la spatialisation des affaissements à l'amont des pistes est liée à la dissolution en amont pendage qui semble provenir essentiellement des nouvelles pistes. Il est intéressant de constater qu'il n'y plus d'affaissement à l'amont de la piste 1 jusqu'à Miéry, ce qui marque probablement une certaine « cicatrisation » de la liaison hydraulique ;

- si l'on analyse l'évolution des affaissements au cours du temps à l'amont des pistes sur la période considérée de 1995 à 2016, on remarque (Tableau 5) :
 - o consécutivement à la reprise de l'exploitation « 100 % » Poligny de 1995 à 1998, le rythme des affaissements a diminué sensiblement pour atteindre de l'ordre de 0,5 cm/an à Miéry actuellement ;
 - o les cartes présentées en Annexe 5 mettent en évidence à partir de la période 2006-2010 une discontinuité de la zone affaissée entre l'amont des pistes et Miéry. Ce hiatus peut avoir plusieurs origines :
 - 1) le cheminement de la dissolution emprunte un autre passage non couvert par le nivellement. Cette hypothèse apparaît assez faible compte tenu de la bonne couverture du nivellement ;
 - 2) les affaissements sont trop faibles pour être détectés ;
 - 3) le système de dissolution se résorbe et ne subsiste actuellement que des affaissements résiduels différés à Miéry ;

Dans cette dernière hypothèse, on peut envisager également qu'une partie des eaux douces proviennent directement de l'aplomb de la zone de Miéry.
- l'analyse des deux dernières années de suivi des affaissements (2014-2016) confirme la tendance observée depuis l'arrêt de l'exploitation. A l'exception de l'environnement du sondage 8 (cf. § 5.4.2), il reste une petite zone affaissée au nord de la grange Moussard (de l'ordre du cm, voire moins) et deux bornes isolées qui se sont abaissées de 1 cm. L'effet de dissolution en amont pendage semble avoir complètement disparu. Pour le secteur des nouvelles pistes, on gardera à l'esprit que de nombreuses bornes situées à l'aval des zones effondrées n'ont pas été relevées depuis deux ans car situées maintenant dans une zone considérée en aléa fort d'effondrement (voir § 6.2). Il en résulte que l'activité de dissolution à proximité immédiate des nouvelles pistes, si elle est maintenue, n'est maintenant plus suivie.

On retiendra que l'activité globale de la nappe salée semble se ralentir de façon continue depuis le début des années 2000 et que cet effet est particulièrement marqué à l'amont pendage des pistes.

Cela suggère que la salinité globale des eaux du système soit remontée, limitant les dissolutions au toit du gisement de sel et par conséquent, les affaissements en surface. Cette hypothèse est discutée dans la partie hydrogéologique (cf. §8).

Tableau 5 : Affaissements maximum mesurés à l'amont des pistes de Poligny

	1995-2000	2000-2010	2006-2010	2012-2016	2014-2016
Amont nouvelles pistes	6 cm/an	3 cm/an	3 cm/an	< 0,5 cm/an	< 0,5 cm/an
Miéry	>2 cm/an	< 1 cm/an	< 0,5 cm/an	< 1,5 cm/an	< 0,5 cm/an

Pour finir, la Figure 29 montre l'évolution de l'ensemble des bornes de nivellement depuis les années 1950 pour le secteur amont des pistes et celui de Miéry. Sur l'ensemble de la période de mesure, il n'est pas mis en évidence d'évolution par à-coup de l'affaissement, quels que soient le secteur et les bornes de mesure. Au contraire le rythme des affaissements suggère une réponse continue à la dissolution des terrains sus-jacents soulignant le caractère globalement souple des terrains de recouvrement et l'absence de banc suffisamment résistants sur le plan mécanique pour générer des mouvements de terrains brutaux.

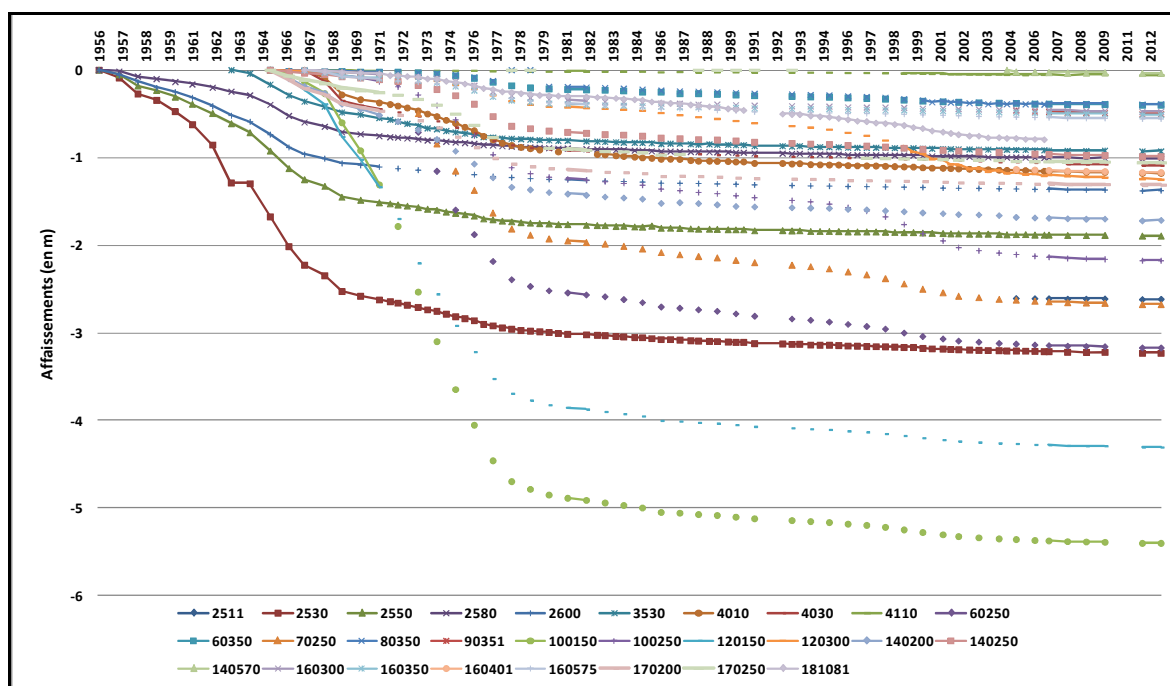


Figure 29 : Evolution de l'affaissement depuis les années 1950 à l'amont des pistes et dans le secteur de Miéry

5.2.4 CAS DES AFFAISSEMENTS DE MIÉRY

Les mécanismes à l'origine des affaissements à Miéry (immédiatement au nord-est du village) ont été analysés et décrits dans un article présenté au SMRI¹⁶ en 2005 par B. Feuga (2010).

Ils sont illustrés par la Figure 30, la Figure 31 et la Figure 32 :

¹⁶ SMRI : Solution Mining Research Institute

- la démonstration d'une connexion hydraulique avec l'amont des pistes a été faite dans les écrits de Ledoux et Combes, repris par Feuga et il n'y a aucune raison objective de la remettre en cause ;
- les affaissements étaient actifs à Miéry avec un rythme de l'ordre 1 cm/an au centre de la zone concernée jusqu'en 2010. La Figure 32 présente l'extension spatiale de ces affaissements sur la période 2006-2010 ;
- le mécanisme à l'origine des affaissements est bien connu. Il a été observé (et est parfois bien documenté) sur de nombreux sites d'exploitation de sel en couche à faible ou moyenne profondeur (< 200-250 m). C'est le cas en particulier à Sarralbe¹⁷ pour citer un exemple comparable. Lorsque les pistes ne sont plus étanches, comme cela est le cas après les effondrements ou lorsque la cavité se situe dans le recouvrement, les eaux douces provenant des terrains surincombants et de la surface peuvent migrer vers le gisement. Les conditions d'entrée d'eau douce dans le système ont été discutées dans les parties relatives au fonctionnement hydrogéologique du site. Du fait du contraste de densité entre l'eau douce et la saumure, l'eau douce qui s'introduit au toit du gisement de sel aura une tendance naturelle à surnager par rapport à la saumure et donc à migrer vers l'amont pendage de la couche de sel. Un front de dissolution peut alors progresser en direction de cet amont pendage. La Figure 30 illustre ce mécanisme dans le cas de Miéry ;
- le contexte géologique et structural local est clairement responsable du développement spatial des affaissements. Les différentes figures présentées ci-après permettent d'illustrer ce contexte. La Figure 32 positionne spatialement le toit du sel (iso-valeurs déterminées à partir des sondages électriques et du forage de 1972). La topographie du sel présente à cet endroit un apex culminant à 205 m NGF environ¹⁸ et à 180 m de profondeur. Cette singularité explique la grande constance spatiale des affaissements depuis la mise en place du phénomène. Les eaux douces se concentrent naturellement au niveau de cet apex puis, se chargeant en sel, elles deviennent plus denses et doivent alors trouver un chemin vers l'aval hydraulique. La pérennité de ces affaissements indique qu'une circulation des eaux en régime permanent a pris place dans ce secteur. Les exutoires les plus évidents de l'eau salée se situent en direction des pistes et du système drainé par les horizons dolomitiques et le réseau des failles (Figure 30). La progression de la dissolution à la retombée de l'apex du toit du sel, vers le sud-ouest en direction du centre du village de Miéry n'est pas envisageable (la saumure empêche la dissolution du toit à l'aval pendage s'il n'y pas de circulation possible dans cette direction). Ceci n'a d'ailleurs pas été constaté depuis la mise en place du phénomène. A noter qu'un second et un troisième apex ont été déterminés grâce aux sondages électriques immédiatement au sud du village. L'extension partielle du réseau de nivellement dans ces secteurs ne semble pas indiquer de mouvements de terrain spécifiques. Il n'est pas

¹⁷ Sarralbe : ancienne exploitation par dissolution de Solvay à la limite des départements de la Moselle et du Bas-Rhin.

¹⁸ Si l'on considère que le forage Miéry 1 de 1972 est bien localisé à l'aplomb de cet apex, ce qui semble être assez juste si l'on intègre les résultats des sondages électriques.

envisageable qu'il y ait de la dissolution dans ces secteurs liée à l'exploitation de Poligny ;

- comme discuté au paragraphe précédent, concernant la pérennité de ce système, l'analyse en retour d'expérience de ce phénomène montrait une très grande constance dans le temps jusqu'en 2010. Depuis cette date, qui correspond à la fin d'activité de dissolution sur le site, le nivellement a clairement mis en évidence une atténuation forte de l'affaissement dans ce secteur (quelques mm/an tout au plus). Une tendance à la stabilisation globale semble même s'amorcer. La connexion hydraulique entre cette zone, celle des pistes et *a fortiori* avec le système des sources n'apparaît pas (ou plus) active. Il convient cependant de rester prudent car on ne peut exclure une réactivation du système à la faveur d'effondrement de cavités dans le secteur des nouvelles pistes ;
- depuis le début du phénomène, les mouvements de terrain observés sont de type affaissement, donc à caractère plutôt souple. C'est en général ce qui est observé à l'aplomb des nappes salées actives. L'analyse faite par Feuga (Figure 31) suggérait éventuellement des mouvements possibles plus brutaux. Les analyses d'affaissement (Figure 29) et du contexte géologique et structural ne permettent pas de retenir cette hypothèse (en particulier, la nature discontinue des bancs les plus résistants, notamment la dolomie de 10 m).

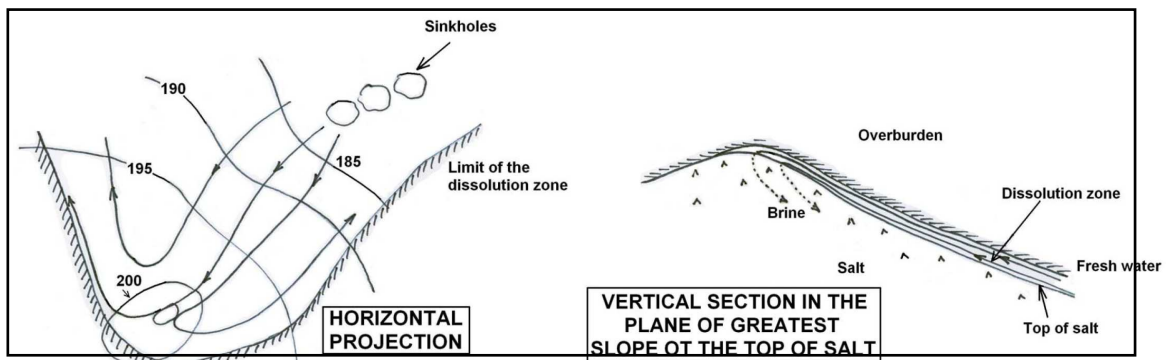


Figure 30 : Interprétation des affaissements à Miéry (d'après Feuga, 2005)

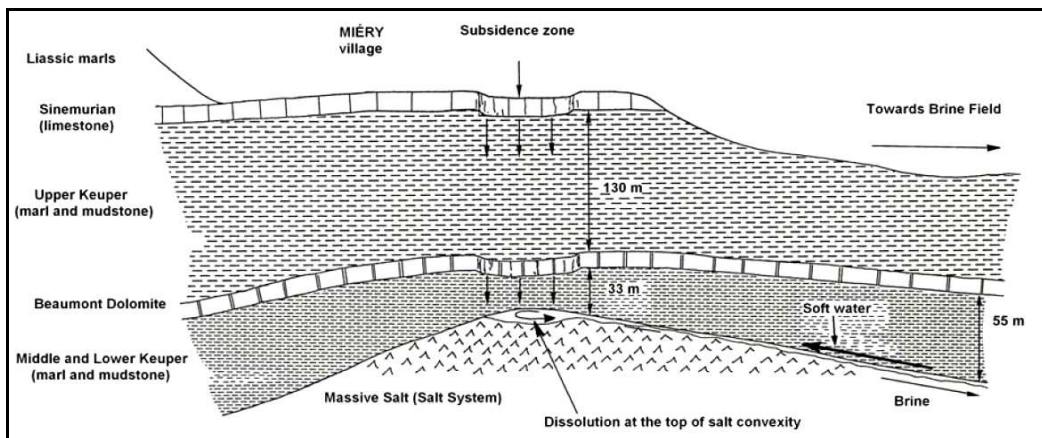


Figure 31 : Représentation simplifiée de la dissolution à Miéry (d'après Ledoux et Combes, 1986, reprise par Feuga, 2005)

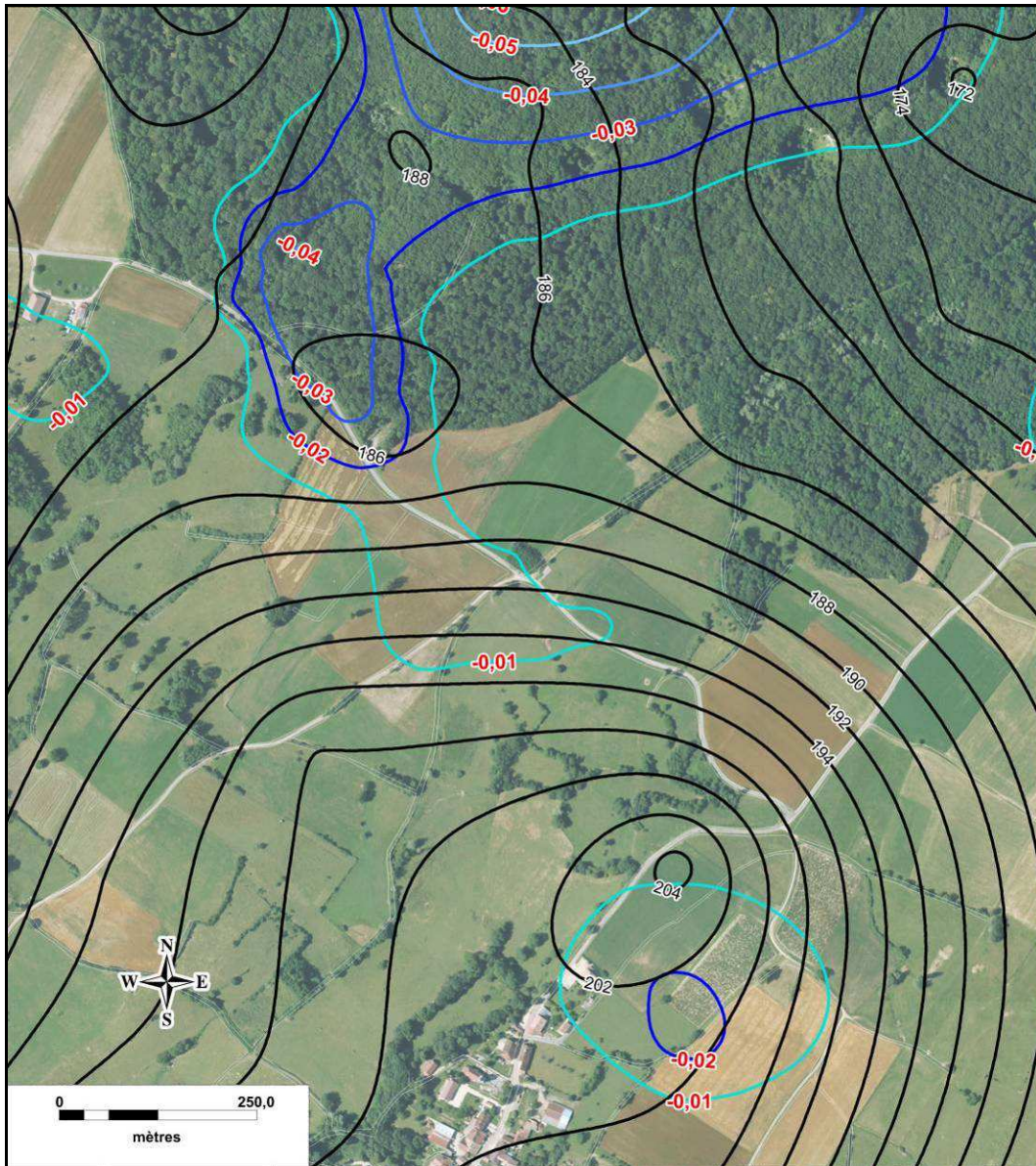


Figure 32 : Cartographie du toit du sel et des affaissements durant la période 2006-2010 dans le secteur de Miéry
 (courbes noires : isovaleurs du toit du sel en m NGF, courbes de couleur, isovaleurs de l'affaissement en m)

5.3 DÉPLACEMENTS LIÉS AUX MOUVEMENTS DE PENTE

Les principaux phénomènes de mouvements de terrain observés sur le site de Poligny ont été caractérisés dans les paragraphes précédents.

Les observations effectuées sur les photographies aériennes pour les effondrements les plus anciens, et plus particulièrement sur le terrain aux abords des effondrements les plus récents des nouvelles pistes, montrent la mise en place de glissements de pente plus ou moins prononcés en liaison avec les effondrements.

Ils sont liés :

- aux pentes abruptes des effondrements, en équilibre limite lorsqu'ils surviennent ;

- à la nature des terrains concernés, marneux et donc sensibles aux phénomènes de glissement ;
- à la topographie des terrains qui est prononcée dans certains secteurs (à l'est de la piste 1, en particulier en direction du plateau).

Aux abords immédiats de l'ensemble des cratères, ce phénomène se produit du fait de la pente généralement forte des bordures des effondrements. Il est bien sûr plus sensible pour les cratères récents. Pour ces derniers, le profil d'équilibre n'est pas encore atteint et les évolutions sont visibles à l'œil nu.

5.4 ANALYSE SPÉCIFIQUE DU CONTEXTE DE L'AVAL DE LA PISTE 1

Le tronçon aval de la piste 1 a fait l'objet d'investigations complémentaires afin de préciser les caractéristiques d'exploitation de cette très ancienne partie de l'exploitation.

Ce secteur est situé hors du périmètre clôturé du site et donc en grande partie accessible au public. Les caractéristiques de cette exploitation n'étaient pas parfaitement connues et laissaient supposer l'existence de cavités susceptibles de générer des effondrements en surface. Face à cette situation potentielle de risque, des investigations complémentaires ont été entreprises par l'exploitant afin de préciser les caractéristiques des éventuelles cavités.

L'environnement du sondage 8 ayant été affecté de mouvements de terrain de type affaissement (visibles encore en 2016), il était également nécessaire d'investiguer cette zone pour établir ou non un lien entre ces mouvements et l'ancienne exploitation.

5.4.1 DIAGRAPHIES ET MESURES SONAR

En 2014, des diagraphies gamma-ray et gamma-gamma des sondages de l'aval de la piste 1 ont été réalisées. Elles n'ont été menées que sur les parties libres des colonnes des casings. Les sondages B, 4, 10, 12, 13, 15 à 17 ont été investigués.

En 2016, des moyens complémentaires de foration ont été mobilisés. Ils ont permis de reforer les cimentations des sondages 7, 8 et 10 mises en place en 1974 et de permettre une exploration complète de leur colonne libre. Tous les forages suivants ont été investigués : 4, A, B, 5, 7, 8, 10, 11, 12, 13. Cinq d'entre eux ont révélé la présence d'une cavité franche pour lesquelles des mesures sonar ont été réalisées (sondages 7, 8, 10, 11 et 12).

La Figure 33 et la Figure 34 montrent les résultats, en plan et en coupe des investigations réalisées en 2016. Ces deux figures sont extraites respectivement de l'Annexe 6 où la coupe est présentée au format A3 avec plus de détails et de la carte informative en Annexe 7.

Les diagraphies des sondages 4, 5, A et B qui constituent l'extrême aval de la piste ont pu être réalisées jusqu'à des profondeurs comprises entre 183 m et 209 m, correspondant à la partie inférieure du gisement. L'équipement de ces sondages avec des casings crépinés n'a pas permis de faire des mesures sonar. La base des casings ne débouche pas dans une cavité. Il est logique de retenir que seul un chenal de communication est présent à la base du gisement dans cette partie extrême aval de la piste.

Pour les sondages 7, 8, 10 à 12, les sonars ont permis de caractériser des cavités de 6 à 10 m d'ouverture situées entre 10 et 26 m sous le sommet du gisement de sel. Leur toit est de forme globalement circulaire avec des portées de 30 à 50 m. Les volumes de vide calculés varient de 4000 à 5000 m³.

Le sondage 9 n'a pas été reforé. La seule indication disponible à ce jour est celle de la base de la cimentation indiquée dans les archives à 162 m de profondeur, soit à une profondeur intermédiaire entre le toit des deux cavités qui encadrent ce sondage. Il est logique d'envisager une cavité de taille équivalente aux cavités voisines positionnée à cette profondeur.

Remarquons que les cavités des sondages 7, 8 et 11 semblent indiquer que leur toit est bloqué à la base de bancs de sel plus épais.

La diaggraphie réalisée au sondage 13 a été stoppée à 159 m de profondeur, soit moins de 10 m sous le sommet du gisement. Le pied du casing ne débouchant pas dans une cavité, il n'a pas été possible de faire un sonar pour s'assurer de la présence d'une cavité.

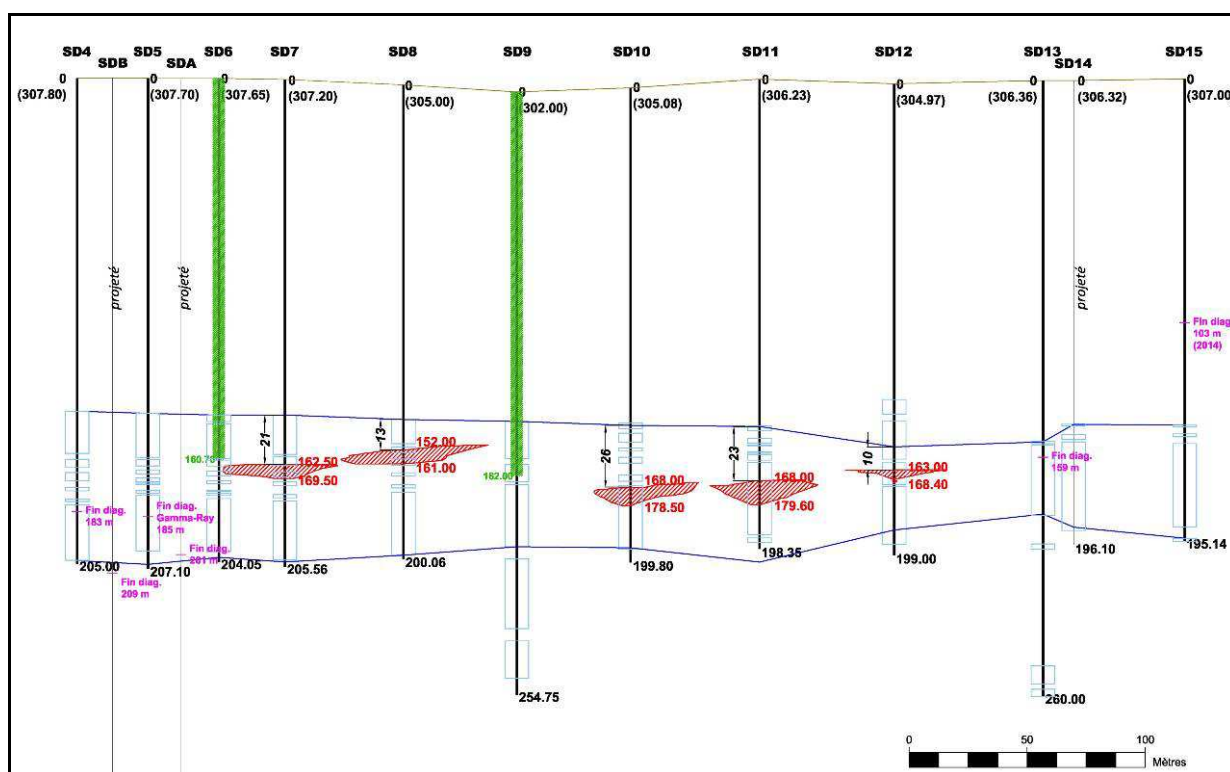


Figure 33 : coupe de l'aval de la piste 1 montrant la position des cavités reconnues en 2016
(en bleu les bancs de sel, en rouge les cavités, en vert les colonnes cimentées)

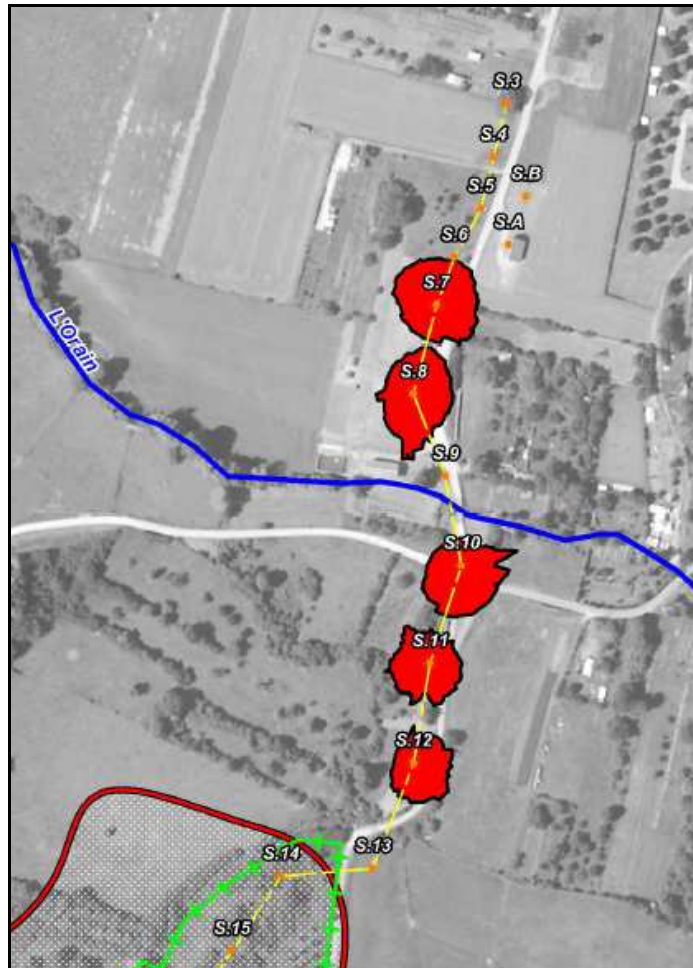


Figure 34 : Projection en surface de l'extension maximale des cavités reconnues en 2016

5.4.2 INVESTIGATIONS DANS L'ENVIRONNEMENT DU SONDAGE 8

La zone du sondage 8 a été le siège à plusieurs reprises de mouvements de terrain observés sur la chaussée de la voie communale.

Entre 1990 et 1996 (événement non daté et localisé précisément), un désordre de faible dimension (1 à 1,5 m de diamètre pour 1 m de profondeur) est apparu sur le bord droit de la chaussée en direction du site. Dans les années qui ont suivi, un seuil est apparu sur la chaussée laissant penser à la mise en place d'un affaissement. En 2009, un nouveau désordre est apparu sur la chaussée, de plus grande dimension (3 x 2 m et 2,5 m de profondeur). Associé à ce désordre, une zone plus vaste s'est affaissée sur un diamètre de 20-25 m et une profondeur de 3-4 cm à près de 8 cm en 4 ans (de l'ordre au plus de 2 cm/an). Cette zone, suivie par nivellement depuis 2009, était encore active entre 2014 et 2016 (4 cm sur une borne) (cf. cartes d'affaissement en Annexe 5).

L'exploitant a procédé en octobre 2016 au décaissement d'une partie de la chaussée de ce secteur sur une dizaine de mètres en linéaire pour explorer la possibilité d'une origine superficielle de ces mouvements de terrain (Figure 35).



Figure 35 : Vue du décaissement pratiqué en octobre 2016 sur la chaussée à hauteur du sondage 8

La tranchée a été creusée jusqu'à 4 m de profondeur et a révélé des remblais peu consolidés et instables, ainsi qu'une arrivée d'eau en fond de fouille provenant du côté de la route. A 4 m de profondeur, on note la présence d'un horizon dur.

L'origine de cette arrivée d'eau correspond à des fuites en provenance du collecteur d'alimentation en eau douce de dilution provenant de Tourmont. Celui-ci passe en effet de l'autre côté de la route.

Les différents mouvements de terrain pourraient donc être corrélés avec ce collecteur. Si celui-ci est défectueux depuis plusieurs années, il peut avoir occasionné, lorsqu'il est en charge, des affouillements à l'origine à la fois des désordres et d'une déstructuration des terrains superficiels occasionnant des affaissements.

Il sera nécessaire de poursuivre les investigations sur ce collecteur pour valider complètement son origine dans les phénomènes observés. En tout état de cause, les investigations réalisées dans le sondage 8 en parallèle ont montré la présence d'une cavité non éboulée à plus de 160 m de profondeur, ce qui est un argument supplémentaire pour dissocier les mouvements de terrains en surface de l'exploitation souterraine.

5.4.3 AVIS SUR LA SITUATION DE L'AVAL DE LA PISTE 1

Concernant les travaux miniers, l'état actuel qui a pu être caractérisé par les diagraphies et sonar de 2016 montre que l'aval de la piste 1 a été exploité du sondage 15, en direction du nord, jusqu'au 7 au moins. Cela signifie qu'une dissolution a bien eu lieu après la formation du chenal initialement positionné à la base du gisement.

Il en résulte la présence de cavités résiduelles en position intermédiaire au sein du gisement entre la base et le sommet de la formation salifère. La corrélation des images sonar avec les coupes géologiques de chaque sondage indique que le toit des cavités semble bloqué pour la plupart d'entre elles par la présence d'un banc de sel plus massif.

Il faut également remarquer que le gisement de sel concerné par ce tronçon aval de la piste 1 présente la particularité d'être peu épais si on le compare avec l'amont de la piste. Dans ce secteur, les coupes des sondages montrent un gisement de 40 à 60 m d'épaisseur environ avec absence totale ou partielle du faisceau supérieur riche en sel. Il en résulte que les cavités présentes sont surmontées pour certaines d'une alternance de bancs de sel de quelques mètres et de bancs de marnes du faisceau intermédiaire seulement.

Compte tenu de la faible épaisseur de sel restant au toit des cavités reconnues (au plus 26 m et jusqu'à 10 m) et de la lithologie particulière montrant des alternances de bancs de sel peu épais et de bancs de marne, la rupture successive des bancs du toit jusqu'aux marnes sus-jacentes ne peut pas être écartée.

Concernant les phénomènes redoutés en surface, induits par la rupture potentielle de ces cavités, les mécanismes suivants doivent être considérés¹⁹ :

- rupture des bancs de sel et de marne au toit de la cavité et foisonnement de ces bancs dans la cavité ;
- délitement progressif des horizons marneux qui constituent l'essentiel des terrains sus-jacents (les horizons dolomitiques ne jouent pas de rôle mécanique) ; le comportement général mécaniquement souple des terrains de recouvrement exclut toutefois un phénomène de rupture brutal en masse.
- compte tenu des faibles hauteurs (10 m au plus) et volumes (5000 m³ au plus) relativement à la profondeur des cavités (de l'ordre de 160 m), les terrains devraient foisonner complètement bien avant que la cloche d'éboulement n'atteigne la surface du sol ;

Pour fixer les idées, nous avons estimé la remontée de la cloche d'éboulement de la cavité la plus grande, celle du sondage 11, en considérant une hauteur équivalente de vide de 4 m (volume rapporté à la surface du toit, pour tenir compte de la forme en pyramide inversée de la cavité). En prenant un coefficient de foisonnement bas, compris entre 1,1 et 1,2 (tenant compte du contexte des cavités sous eau), la cloche d'éboulement qui se développerait par rupture successive des bancs et délitement des marnes sur la largeur de la cavité ne remonterait pas de plus de 40 m.

Dans ces conditions, seuls des réajustements de terrain venant s'appuyer sur ces zones effondrées pourraient conduire à des affaissements en surface d'intensité limitée.

¹⁹ Ils sont déduits du comportement général des terrains rencontrés sur le site de Poligny, caractérisé grâce à une analyse en retours d'expérience des phénomènes (voir § 5)

Si l'on estime que le tassement des terrains foudroyés était de 1 à 2 m, ce qui semble très sécuritaire par rapport à la hauteur moyenne de la plus grande cavité (4 m pour la cavité du sondage 11), les déplacements en surface pourraient être de quelques décimètres au centre de la cuvette affaissée²⁰.

Extension des configurations connues aux autres sondages

En considérant le mode d'exploitation par pistes d'un point de vue général et, celui en particulier de l'exploitation de cet aval de piste 1²¹, il serait logique d'envisager :

- un chenal en place à la base du gisement pour les extracteurs et sondages de la partie terminale de la piste (3, 4, 5, A et B). Cela semble logique au vu des diagraphies réalisées (SD A, B, 4) qui ont pu être menées jusque dans le faisceau inférieur ;
- une situation potentiellement équivalente aux sondages 7 et 8, pour le sondage 6 (non investigué) ;
- une situation équivalente aux sondages 8 et 10 pour le sondage 9 ;
- la présence de cavités de plus grandes dimensions que celles reconnues pour les sondages 14 et 15 qui étaient proches du point d'injection d'eau douce lorsque ce tronçon aval était exploité ;
- le sondage 13 n'a pas pu être reconnu par sonar. Seule une diagraphie arrêtée moins de 10 m sous le toit du sel a été réalisée. Il serait logique de considérer une cavité équivalente aux sondages situés à l'aval, d'autant que le gisement est ici le moins épais (40 m environ). Cependant, en l'absence de données complémentaires et par principe de précaution, on a retenu ici une configuration de grande cavité, comme pour les sondages 14 et 15.

²⁰ En considérant la largeur des cavités (40 m), sous-critiques par rapport à la profondeur (120 m pour la cloche foisonnée), un angle d'influence du volume affaissé de 30° par rapport à la verticale et l'effet cumulé de l'affaissement induit par chaque cavité.

²¹ Ce tronçon aval a été un temps exploité, comme une piste, depuis le sondage 15 vers les extracteurs (cf. § 3.4), le sondage 15 ayant reçu 1,5 Mm³ d'eau douce.

6. EVALUATION DES ALÉAS

6.1 RAPPELS

L'évaluation des aléas dans les contextes d'anciennes exploitations de gisements de sel, en particulier lorsque des techniques de dissolution sont mises en œuvre, revêt un caractère spécifique par rapport aux exploitations minières classiques. Les interactions fortes du sel gemme avec l'eau et le comportement mécanique spécifique de ce dernier jouent ou peuvent jouer un rôle primordial dans l'évolution à court, moyen et long terme des anciens sites d'exploitation.

Un des points importants qui diffère de l'approche habituelle d'évaluation des aléas est lié au caractère évolutif potentiel des anciens sites d'exploitation lorsque des dissolutions demeurent effectives sur un site donné. En effet, quelle que soit la connaissance que l'on peut avoir d'un site à la fin de son exploitation, une dissolution entretenue peut être de nature à modifier, dans le temps, la morphologie des vides résiduels existants, voire d'en créer de nouveaux. Il en résulte qu'il est délicat, *a priori*, de définir le type de phénomène suspecté, sans connaître, ou au moins supposer, l'évolution de la dissolution après l'arrêt des travaux et sur le long terme.

Compte tenu de l'analyse des mouvements de terrain qui a pu être menée en retours d'expérience (grâce aux données d'exploitation, aux paramètres de suivi et aux observations), les phénomènes suivants sont retenus pour le site de Poligny :

- l'effondrement lié à la rupture du toit des cavités de grandes dimensions ;
- l'affaissement lié à la rupture du toit des cavités de petites dimensions ;
- l'affaissement lié à la dissolution du toit du sel ;
- le glissement lié aux cratères d'effondrement.

L'évaluation de l'aléa lié à ces différents phénomènes est détaillée dans les paragraphes suivants.

6.2 ALEA EFFONDREMENT LIÉ AUX CAVITÉS DE DISSOLUTION

6.2.1 PHÉNOMÈNE REDOUTÉ

L'effondrement caractérise un mouvement d'extension spatiale importante. Il se manifeste par la rupture souvent dynamique de la cavité d'exploitation, affectant ainsi la stabilité des terrains de surface sur des étendues pouvant atteindre plusieurs hectares. Le phénomène redouté ici résulte de la rupture différée du toit d'une cavité dont la taille a fini par dépasser une valeur limite assurant la stabilité de l'ouvrage.

6.2.2 EVALUATION DE LA PRÉDISPOSITION

Fort des analyses en retour d'expérience (§5.1), il est possible de caractériser, au moins pour les tendances et les ordres de grandeur, les critères et comportements principaux qui se dégagent concernant l'évolution des cavités et l'apparition des effondrements :

- 1) les terrains sont globalement souples mécaniquement. En réponse à l'évolution des cavités, ils se déforment et créent d'abord des affaissements dont l'amplitude et la vitesse dépendent de la position de la cavité. Des affaissements continus mesurables ont été caractérisés pour toutes les situations de cavité, y compris lorsqu'elles se trouvent encore dans la masse de sel ;
- 2) en lien avec le caractère souple des terrains, aucun point d'arrêt particulier d'évolution du toit des cavités n'a été caractérisé. Il n'existe pas de banc raide pouvant maintenir sur le long terme des cavités de grandes dimensions ouvertes ;
- 3) il est probable cependant que des cavités encore ouvertes soient présentes dans le recouvrement. Compte tenu des deux points précédents, dans ces deux cas, des situations d'instabilité mécanique doivent être supposées ;
- 4) tant qu'il reste une planche de sel d'épaisseur suffisante (25 m), il n'a pas été observé d'évolution significative du toit des cavités ;
- 5) lorsque la planche de sel est inférieure à 25 m, une évolution est possible et ceci jusqu'à l'apparition en surface d'un effondrement ou, au moins, la mise en place d'affaissements importants (on retiendra une valeur de 1 m pour fixer les idées) ;
- 6) dans le cas précédent, l'analyse des vitesses d'affaissement a montré que la valeur de 2 cm/an devait être considérée comme un seuil à partir duquel des situations d'évolution de cavités jusqu'à un effondrement ou un affaissement significatif pouvaient être envisagées sur le court ou moyen terme (quelques années au plus) ;
- 7) les sondages de reconnaissance (ou de recherche) n'ayant pas provoqué le développement de cavités, il est peu probable que des vides existent à leur droit. Néanmoins, si cela est le cas, ces cavités sont probablement limitées (notamment d'un point de vu de la portée) et leur impact en termes de stabilité des terrains de surface peut être considéré comme négligeable.

Considérant les points précédents, plusieurs configurations ont été retenues pour ces sondages du site de Poligny (*Tableau 6*) :

Tableau 6 : Configurations retenues pour la prédisposition à l'aléa effondrement de terrain

Configuration	Prédisposition à l'effondrement
sondage de recherche	nulle
sondage d'exploitation - zone de chenal dans le faisceau 3 de sel et/ou piste non exploitée	nulle
sondage d'exploitation - cavité de faibles dimensions au toit du sel (y compris sondages S.A à S.12 en aval de la piste 1)	nulle
sondage d'exploitation - cavité effondrée	nulle
sondage d'exploitation - ancienne piste et cavités voisines effondrées	peu sensible
sondage d'exploitation - cavité avérée ou suspectée à plus de 25 m sous le toit du sel (poutre de sel supérieure ou égale à 25 m d'épaisseur au toit de la cavité) et - pas d'anomalie d'affaissement	peu sensible
sondage d'exploitation - cavité avérée ou suspectée à plus de 25 m sous le toit du sel (poutre de sel supérieure ou égale à 25 m d'épaisseur au toit de la cavité) et - vitesse d'affaissement supérieure à 2 cm/an ou anomalie d'affaissement	sensible
sondage d'exploitation - cavité avérée ou suspectée au-dessus du toit du sel	très sensible
sondage d'exploitation - cavité avérée ou suspectée à moins de 25 m sous le toit du sel (poutre de sel inférieure 25 m d'épaisseur au toit de la cavité) (y compris sondages S.13 en aval de la piste 1)	très sensible

6.2.3 EVALUATION DE L'INTENSITÉ

La méthode d'exploitation mise en œuvre par pistes et sondages conduit à la création de grandes cavités et à leur effondrement volontaire. Les effondrements en surface sont de grandes dimensions. Dans une situation d'exploitation optimale, il a été montré qu'il existait une relation entre l'épaisseur du gisement (et les cavités créées) et les dimensions des effondrements en surface (Figure 24). L'intensité des effondrements est dans tous les cas élevée.

De plus, les événements attendus, de grande ampleur, sont confirmés par les effondrements observés sur le site de Poligny (diamètres supérieurs à 30 m).

6.2.4 EVALUATION DE L'ALÉA

Par croisement de la prédisposition et de l'intensité, le niveau d'aléa effondrement lié aux cavités de dissolution est qualifié de :

- fort pour les sondages dont l'exploitation a été menée dans la masse de sel avec une épaisseur résiduelle de sel au toit de la cavité faible (inférieure à 25 m) et pour les sondages où la cavité suspectée ou avérée est au-dessus du toit du sel ;
- fort pour sondages dont l'exploitation a été effectuée au sein de la masse de sel avec une épaisseur résiduelle de sel au toit de la cavité supérieure ou égale à 25 m mais où une anomalie d'affaissement a été détectée (vitesse d'affaissement supérieure à 2 cm/an) ;
- moyen pour les sondages des anciennes pistes (pistes 1, 100, 200 et 400), à proximité d'effondrements répertoriés ou dans la zone amont des pistes (sondages 419 à 424) ;
- moyen pour les sondages dont l'exploitation a été effectuée au sein de la masse de sel avec une épaisseur de sel résiduelle au toit de la cavité supérieure ou égale à 25 m et où aucune anomalie d'affaissement n'a été détectée ;
- nul pour les sondages ayant conduit à la création de vides de faibles dimensions, au toit du sel (sondages de Terville) ou dans la masse de sel, (sondages de l'aval de la piste 1, S.A à S.12). Pour ceux-ci un aléa affaissement est par contre retenu (cf. § 5.4.3) ;
- nul pour les zones où l'exploitation s'est limitée à la création d'un chenal dans le faisceau 3 du sel (les cavités ont des dimensions caractéristiques de chenal de 5 à 10 m de hauteur et une cinquantaine de mètres de largeur maximum et ont en général une épaisseur résiduelle de sel de 40 à 50 m au toit) et pour la piste 600, non exploitée. Une discussion sur les mouvements de terrain redoutés dans ce contexte est présentée dans la section relative aux affaissements ;
- nul pour les sondages de reconnaissance (ou de recherche) et les cavités effondrées.

6.2.5 CARTOGRAPHIE DE L'ALÉA

Pour l'effondrement, la cartographie de la zone d'aléa est définie principalement à partir de l'extension possible de la cavité créée au droit de chaque sondage d'exploitation. A cette extension s'ajoute une marge d'influence qui correspond à l'extension latérale maximale de l'effondrement en surface, y compris le déport possible par rapport à l'axe de la piste (cf. § 5.1.5).

Compte tenu des retours d'expérience sur les dimensions des effondrements survenus sur le site depuis 1943 (cf. § 5.1.5 et Annexe 4), le zonage de l'aléa effondrement est circulaire, centré sur le sondage, d'un rayon global maximum de 80 m (comprenant l'extension latérale maximale à long terme du phénomène et son possible déport par rapport à l'axe de la piste).

La carte de l'aléa effondrement est présentée en Annexe 8.

6.3 ALÉA AFFAISSEMENT LIÉ À LA RUPTURE DU TOIT DE CAVITÉ DE FAIBLES DIMENSIONS

6.3.1 PHÉNOMÈNE REDOUTÉ

Certaines méthodes de dissolution peuvent conduire à l'apparition de mouvements de terrains souples de type affaissement en surface. Les vides créés au toit du sel se referment très rapidement sans avoir atteint des dimensions telles qu'ils pourraient occasionner des effets plus brutaux de type effondrement. C'est le cas de la méthode d'exploitation des puits de Terville.

Sur la concession de Poligny, compte tenu de la nature des terrains de recouvrement, de l'absence de bancs mécaniquement compétents et des dimensions relativement faibles des cavités de l'aval de la piste 1, ce phénomène d'affaissement a été considéré à l'aplomb des cavités de ce tronçon de piste.

Enfin, partout où subsiste un chenal de communication situé à la base du gisement (cas de l'aval des pistes à proximité des extracteurs) et de la piste 600 non exploitée, il peut exister un affaissement lié au fluage du sel.

6.3.2 EVALUATION DE LA PRÉDISPOSITION

Comme précisé au paragraphe 3.3, la méthode de dissolution par sondages isolés mise en œuvre à Terville (sondages P.I et P.II) est susceptible de conduire à l'apparition de mouvements de terrains souples de type affaissement en surface.

De la même façon, les investigations menées récemment par sonar dans les sondages situés à l'aval de la piste 1 (sondages S.A à S.12, cf. §5.4) ont permis d'évaluer les dimensions des cavités créées. L'effondrement des vides de faibles dimensions détectés lors de ces investigations pourrait provoquer à terme (compte tenu de la nature des terrains) un affaissement en surface.

Dans le premier cas (sondages P.I et P.II), il est probable que l'essentiel des affaissements se soit déjà produit. Des injections pratiquées en 1970, ont d'ailleurs permis de combler les vides résiduels. La prédisposition du phénomène d'affaissement de terrain au droit de cette zone est donc qualifiée de peu sensible.

Dans le cas des cavités reconnues à l'aval de la piste 1 et par extension de celles dont la configuration est jugée identique, on ne peut exclure une évolution du toit des cavités avec des ruptures des bancs sus-jacents. L'épaisseur des bancs de sel restant n'est pas suffisante pour garantir la stabilité sur le long terme des cavités. Au vu de l'historique d'exploitation de cette piste et des investigations successives (depuis 1974), il ne semble pas qu'il y ait eu d'évolution significative du toit des cavités. De plus, aucun affaissement significatif des têtes de sondage n'a été caractérisé. Dans ces conditions, la prédisposition au phénomène d'affaissement est également jugée peu sensible pour l'ensemble de l'aval de la piste 1.

Pour les chenaux de communication des pistes, seul le phénomène de fluage du sel doit être considéré²². Il occasionne une déformation continue des parois de la cavité. Ce phénomène ne sera stoppé que lorsque la cavité sera complètement refermée.

6.3.3 ÉVALUATION DE L'INTENSITÉ

Pour l'affaissement, les classes d'intensité sont définies en considérant l'effet de mise en pente du sol.

Les valeurs limites pour chaque classe sont identiques dans les différents documents de référence : le guide PPRM pour les anciennes exploitations minières, le guide PPRN cavités pour les carrières abandonnées ou cavités naturelles. Dans le cadre de cette étude, on se basera donc sur ces classes d'intensité. Les classes définies dans ces différents guides sont détaillées dans le Tableau 7.

Tableau 7 : Classes d'intensité de l'aléa affaissement

Classe d'intensité	Mise en pente (en %)
Très limitée	$0 < P_m < 1$
Limitée	$1 < P_m < 3$
Modérée	$3 < P_m < 6$
Elevée	$P_m > 6$

L'effet de mise en pente est estimé directement à partir des valeurs d'affaissement et de l'extension de l'affaissement en surface selon l'équation suivante :

$$P_m = \frac{A_m}{L}$$

avec

P_m : pente moyenne

A_m : affaissement moyen de la surface du sol

L : extension de l'affaissement correspondant aux valeurs d'affaissement prises en compte

Les affaissements étant assimilés à des mouvements lents et progressifs des terrains, les valeurs de mise en pente peuvent évoluer au cours du temps. Afin de prendre en considération ce caractère évolutif, l'intensité a été définie en considérant une période de 100 ans.

²² Le fluage concerne bien sûr l'ensemble des cavités dans le sel mais, dans les autres cas que le chenal de communication, les phénomènes retenus (effondrement ou affaissement) sont largement prépondérants devant les conséquences du fluage du sel à la surface du sol.

Chenaux de communication

Le fluage dépend du déviateur de contraintes qui est lié à la profondeur de la cavité, à la présence ou non de saumure en charge ainsi qu'à la température. Pour que se développe un fluage important, et donc des effets perceptibles en surface, il faudrait que les cavités se situent à des profondeurs importantes et soient soumises à des températures élevées. A Poligny, les cavités se trouvent à faible profondeur (et donc à faible température) et sont remplies de saumure sous une pression halmostatique équivalente à leur profondeur. Cela ne permet pas de développer un fluage perceptible en surface sur l'échelle de temps considérée : l'intensité des affaissements potentiellement induits par le fluage du sel est donc considérée comme négligeable sur cette échelle de temps. Des modélisations numériques ont été réalisées pour le DADT des concessions SOLVAY de sel de Sarralbe pour des situations équivalentes. Il a été montré que l'affaissement en surface lié au fluage du sel était inférieur à 1 mm/an en régime de fluage établi (une fois passée la phase de creusement du chenal ; voir Figure 36).

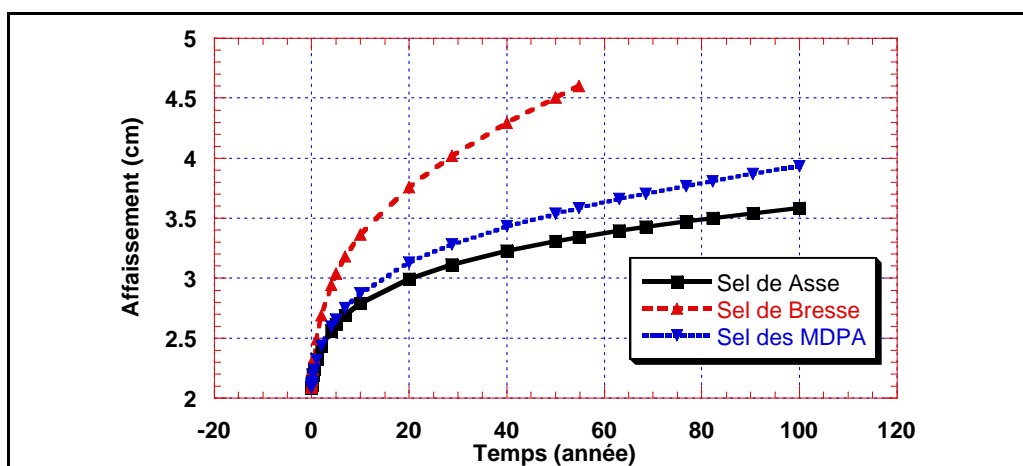


Figure 36 : Evolution de l'affaissement maximum de la surface du sol lié à un chenal de dissolution isolé, modélisé en axisymétrie pour différents types de sel
(DADT Sarralbe, Ghoreychi, 2001)

Cavités à l'aval de la piste 1 et sondages de Terville

Pour les cavités à l'aval de la piste 1, l'intensité maximale des affaissements potentiellement redoutés sera classée comme « limitée ». Il faudrait que l'affaissement maximal dépasse 1 mètre pour que les mises en pente atteignent une intensité « limitée » en considérant une cuvette de 160 m de largeur (valeur retenue pour les effondrements). Les affaissements potentiels attendus ne dépasseront pas quelques décimètres au maximum.

Pour les sondages de Terville, s'il subsiste encore des cavités, elles ne pourraient être que de dimensions plus faibles par rapport à celles de la piste 1. En conséquence, l'intensité des affaissements potentiels ne pourra être qu'inférieure. Nous retenons une intensité « très limitée ».

6.3.4 EVALUATION DE L'ALÉA

Par croisement de la prédisposition et de l'intensité, le niveau d'aléa affaissement lié à la rupture du toit de cavité de faibles dimensions est qualifié de :

- faible, au droit de l'exploitation menée par la méthode des sondages isolés sur les deux sondages de Terville (P.I et P.II) ;
- faible, à l'aval de la piste 1 (sondages S.A à S.12) ;
- nul (à l'échelle de temps considérée) pour les chenaux de communication.

6.3.5 CARTOGRAPHIE DE L'ALÉA

D'après les retours d'expérience des effondrements et affaissements sur le site de Poligny, une zone circulaire d'un rayon de 80 m, centrée sur le sondage, a été retenue (y compris marge d'incertitude et d'extension) pour cartographier l'aléa affaissement lié aux cavités de faibles dimensions.

La carte de l'aléa affaissement est présentée en Annexe 9.

6.4 ALÉA AFFAISSEMENT LIÉ À LA DISSOLUTION AU TOIT DU SEL

6.4.1 PHÉNOMÈNE REDOUTÉ

Les modifications hydrogéologiques induites par les exploitations de sel peuvent créer, de manière pérenne ou durant des périodes prolongées, des circulations d'eaux peu ou non saturées à la surface des couches de sel. Lorsqu'une dissolution active s'établit à l'interface sel-terrain de recouvrement, la perte de matière engendrée par la dissolution à cette interface va être compensée en continu par l'abaissement souple des terrains de recouvrement (s'ils sont mécaniquement peu résistants comme des argiles ou des marnes) et créer ainsi un affaissement en surface.

Si les terrains sus-jacents ont une résistance mécanique plus élevée et permettent de maintenir des vides francs ouverts, du moins temporairement, cette situation peut être à l'origine de l'apparition en surface d'un effondrement localisé.

Sur la concession de Poligny, compte tenu de la nature des terrains de recouvrement et de l'absence de bancs compétents particuliers, le seul phénomène retenu est de type affaissement.

6.4.2 ÉVALUATION DE LA PRÉDISPOSITION

Le fonctionnement hydrogéologique actuel (intégrant le régime des sources) correspond à une situation toujours active du système de dissolution dans son ensemble.

Cependant, les affaissements qui marquent l'activité de la nappe salée ont permis de montrer que la situation n'était pas homogène sur l'ensemble du secteur d'analyse : il existe des zones qui restent toujours actives (nouvelles pistes) tandis qu'une stabilisation globale s'instaure dans les autres secteurs.

Par conséquent, la prédisposition au phénomène d'affaissement par dissolution au toit du sel est ainsi jugée « sensible » dans les zones toujours actives correspondant aux nouvelles pistes.

Il a été montré que lors de la dernière période active d'exploitation (*i.e.* 1995 à 1998, qui correspondait à une dissolution « 100 % Poligny), les affaissements, notamment liés à la dissolution à l'amont pendage, ont été réactivés (voir § 5.2.3).

Cette relative facilitée à réactiver les circulations hydrauliques a été prise en compte. Ainsi, le niveau « sensible » de prédisposition au phénomène d'affaissement lié à la dissolution est étendu à l'ensemble des secteurs où la dissolution pourrait être réactivée dans l'éventualité d'une évolution du système hydrogéologique.

6.4.3 EVALUATION DE L'INTENSITÉ

En retenant comme période de référence celle de 1995 à 2000, l'intensité des affaissements mesurés était de 2 à 6 cm par an selon les secteurs considérés (cf. § 5.2). De tels affaissements seraient un extrême majorant dans le contexte actuel post exploitation, y compris en considérant une augmentation de la dissolution au toit du gisement. En effet, si l'on considère une zone de dissolution active concentrée sur 100 ha pour être majorant (soit un tiers de la surface retenue pour les affaissements) et un affaissement moyen de 4 cm/an, cela correspondrait à un tonnage annuel 20 fois supérieur à celui évacué actuellement aux sources. Actuellement, le tonnage de sel issu des sources, traduit en termes d'affaissement, correspondant à une vitesse d'affaissement de 2 mm/an environ sur la même surface.

Sans aller rechercher un retour à l'intensité de dissolution de la période 1995-2000 qui apparaît irréaliste, toujours dans le cadre d'une approche conservative, nous retenons des affaissements qui correspondraient à un doublement du débit régime des sources, soit de l'ordre 4 mm/an localement. Les surfaces concernées étant par définition étendues, la dissolution se répartissant au toit du gisement sur de grandes distances (une centaine de mètres est un minimum au vu des observations réalisées), les mises en pente seront très faibles, de l'ordre ou inférieur au pourcent, sur la période de temps considérée. Ceci correspond à une intensité maximum « limitée ».

6.4.4 EVALUATION DE L'ALÉA

Par croisement de la prédisposition et de l'intensité, le niveau d'aléa affaissement lié à la dissolution du sel au toit de la couche est qualifié de faible dans l'ensemble du périmètre d'affaissement historique (1995-2000) qui correspond aux zones de dissolution active et potentiellement réactivable du toit du sel.

6.4.5 CARTOGRAPHIE DE L'ALÉA

L'aléa affaissement lié à la dissolution du toit du sel est situé à l'aplomb direct des zones de dissolution (active ou susceptible de se réactiver). Ces secteurs sont définis à partir de la carte des affaissements (limités à 1 cm) de la période 1995-2000 (Annexe 5).

Aucune marge d'influence n'est retenue compte tenu de l'incertitude déjà présente dans le tracé des zones de dissolution.

La carte de l'aléa affaissement est présentée en Annexe 9.

6.5 ALEA GLISSEMENT LIÉ AUX CRATÈRES D'EFFONDREMENT

6.5.1 PHÉNOMÈNE REDOUTÉ

A Poligny, des mouvements de pente de type glissement sont retenus sur les flancs des cratères d'effondrement dont les pentes localement abruptes peuvent être le siège de glissement de terrain plus ou moins profonds. Les effondrements récents montrent que leurs flancs ne sont pas stabilisés. Avec le temps, les talus atteignent un profil d'équilibre mais leur stabilité peut être affectée par des causes exogènes (fortes précipitations, période de gel/dégel, dissolutions profondes).

6.5.2 ÉVALUATION DE LA PRÉDISPOSITION

Tous les effondrements sont concernés par cet aléa.

En bordure de cratères, on peut considérer que la zone a été fortement déstructurée à l'issue de l'effondrement, permettant ainsi aux eaux de surface de s'infiltrer plus facilement dans le massif. Ces zones sont donc naturellement prédisposées pour des mouvements de type glissement. Ces glissements peuvent également être accentués par la dissolution au toit du sel en périphérie des zones effondrées.

Les observations réalisées sur les flancs des effondrements les plus récents montrent localement des mouvements de pente de type glissement. Un aléa glissement de niveau sensible est donc retenu au droit des cratères des pistes récentes.

Pour les anciennes pistes, aucun mouvement récent significatif n'est observé. On peut considérer que les flancs des cratères sont globalement stabilisés. La prédisposition au glissement y est jugée peu sensible.

Notons que les pentes des cratères sont bien végétalisées (arbres, arbustes, herbes hautes), ce qui contribue à stabiliser les talus.

6.5.3 ÉVALUATION DE L'INTENSITÉ

C'est principalement le volume de matériau mis en mouvement qui détermine l'intensité du phénomène.

Pour les cratères d'effondrement soumis à des mouvements de pente de type glissement, les volumes attendus mis en jeu peuvent être de quelques centaines de mètres cubes pour fixer les idées. Un niveau d'intensité modérée a été retenu pour ce phénomène.

6.5.4 ÉVALUATION DE L'ALÉA

Par croisement de la prédisposition et de l'intensité, le niveau d'aléa défini pour le phénomène de glissement au droit des cratères d'effondrement du site de Poligny est :

- moyen pour les cratères d'effondrement des pistes récentes (pistes 500, 1500 et 3000) ;
- faible pour les cratères d'effondrement des anciennes pistes (pistes 1, 100, 200 et 400).

6.5.5 CARTOGRAPHIE DE L'ALÉA

L'extension de l'aléa glissement lié aux cratères d'effondrement concerne l'emprise exacte du cratère à laquelle s'ajoute une marge d'influence correspondant au talutage maximum des terrains depuis les bords des cratères.

D'après les retours d'expérience des cratères observés sur les anciennes pistes, une marge globale de 80 m de rayon, centrée sur le cratère, a été retenue pour zoner l'aléa glissement de terrain au droit des cratères d'effondrement de Poligny.

La carte de l'aléa glissement est présentée en Annexe 10.

7. CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE ET HYDROLOGIQUE

7.1 INTRODUCTION

Le contexte géologique du site de Poligny structure fortement les écoulements souterrains. On observe des contrastes marqués, notamment en ce qui concerne la nature et la structure des aquifères présents. A cette diversité hydrogéologique naturelle viennent s'ajouter des modifications tant en termes qualitatifs que structurels, induites par l'exploitation par pistes effondrables développée par l'exploitant depuis le milieu du vingtième siècle.

Les terrains concernés par l'exploitation ont des capacités aquifères réduites et sont clairement séparés du système hydrogéologique du premier plateau jurassien par les différents accidents tectoniques à l'origine du ressaut topographique localisé à l'est de la concession. Les terrains concernés appartiennent au Trias et ont une composante principalement marneuse (marnes irisées) donc peu perméable. Seuls quelques niveaux drainants sont présents. La part du ruissellement de surface est donc prépondérante par rapport à l'infiltration lorsque ces terrains sont présents à l'affleurement.

Les eaux souterraines locales sont à l'origine d'un réseau de cours d'eau, pérennes pour certains et temporaires pour d'autres, qui constituent le bassin versant amont de l'Orain. Ce cours d'eau prend sa source à Poligny au pied du graben de calcaires bathoniens qui marque la limite entre le premier plateau du massif du Jura et la zone dite du Revermont qui est chevauchante sur les terrains tertiaires de la plaine de Bresse. Nous limiterons notre analyse hydrologique et hydrogéologique à la partie amont du bassin versant de l'Orain localisée à l'est du village de Brainans. On trouve dans cette zone, au sud de l'Orain (Figure 2) :

- le ruisseau de l'étang, alimenté en partie par la source « salée » dite de Saint-Lothain (préexistante à l'exploitation), qui se jette rapidement (après 1,5 km d'écoulement selon une direction nord-sud) dans le Ruisseau de Vaivres ;
- le ruisseau de Vaivres a une direction globale d'écoulement est-ouest, qui en aval de la forêt éponyme devient le ruisseau de l'Etang (après confluence avec le ruisseau éponyme) qui lui-même devient le Bief d'Acles au-delà de la confluence avec le ruisseau des Buats. Le ruisseau de Vaivres est alimenté par un certain nombre d'écoulements intermittents qui prennent leur source en amont de la forêt de Vaivres au niveau des têtes de vallons. Il n'existe pas de sources à proprement parler mais on observe la formation d'un écoulement à partir de ruissellements de sub-surface dans la partie altérée des marnes irisées et au niveau d'horizons ayant de meilleures propriétés aquifères comme les grès rhétiens, présents à l'affleurement dans les parties les plus élevées de la forêt de Vaivres ;

Autour de la cote 282 m NGF, un certain nombre d'exutoires liés à l'exploitation viennent alimenter ce cours d'eau. Ces sources salées ont été désignées sous le nom de sources E_H, E_I, E_J et E_K. Il faut ajouter à ces sources l'apport d'eau douce artificiel injecté par l'exploitant au niveau des têtes de Vallons pour diluer le flux d'eau salée en provenance des sources.

- le ruisseau des Buats, avec une direction d'écoulement globalement est-ouest, est alimenté de la même manière que le ruisseau de Vaivres par les

écoulements intermittents au sein de la forêt de Vaivres et par la source E₁₅ située à une cote plus importante (293 m NGF) que le groupe E_{H,I,J,K} (282 m NGF). Ce ruisseau rejoint le ruisseau de l'Etang à 200 mètres au nord de la route N 83 pour former le Bief d'Acles. Comme pour le ruisseau de Vaivres, l'exploitant a mis en place un apport d'eau douce pour y diluer les apports en sel ;

- le Bief d'Acles se jette dans l'Orain au sud de Brainans. Cette confluence constitue le point le plus aval et le plus à l'ouest de la zone d'influence de l'exploitation sur l'Orain ;
- le ruisseau du Son s'écoule du sud vers le nord, il trouve sa source au sein de la forêt de Vaivres de la même manière que le ruisseau de Vaivres et le ruisseau des Buats. Une partie de son débit est formé par la source salée E₀ située à une cote de 291 m NGF. Il rejoint l'Orain au sud de Tourmont au lieu dit « En Recin ».

Au nord de l'Orain, dans la partie du bassin versant qui nous intéresse mais qui n'inclut pas la zone exploitée. On observe les cours d'eau suivants (Figure 2) :

- la Glantine qui comme l'Orain prend sa source à partir des calcaires jurassiques du plateau, en amont de la reculée de Poligny à l'est ;
- le Bief Salé est proche en termes de caractéristiques chimiques de la source salée de Saint-Lothain, qui draine une partie des terrains triasiques situés au nord de Tourmont ;
- le ruisseau de la Braye.

Les résultats qui vont être présentés ici proviennent de trois campagnes de mesures des paramètres physico-chimiques et de prélèvements pour analyse de la composition en éléments majeurs réalisés en juin 2012, juillet 2015 et juillet 2016.

7.2 IDENTIFICATION DES AQUIFÈRES EN PRÉSENCE

7.2.1 APPORT DE L'ÉTUDE DES PARAMÈTRES PHYSICO-CHIMIQUES

La mesure des paramètres physico-chimiques des exutoires de la région de Poligny (mesures réalisées en juin 2012) permet de différencier quatre familles d'eaux souterraines à partir de leurs valeurs de conductivité électrique croissante (Figure 37 et Figure 4) :

- un groupe d'eaux avec une conductivité électrique comprise entre 350 et 1000 $\mu\text{s.cm}^{-1}$;
- un groupe avec des valeurs comprises entre 1000 et 3000 $\mu\text{s.cm}^{-1}$;
- un groupe d'eaux très minéralisées avec des conductivités électriques s'échelonnant de 10 à 15 ms.cm^{-1} ;
- un point de mesure affichant une conductivité électrique de 50 ms.cm^{-1} ;

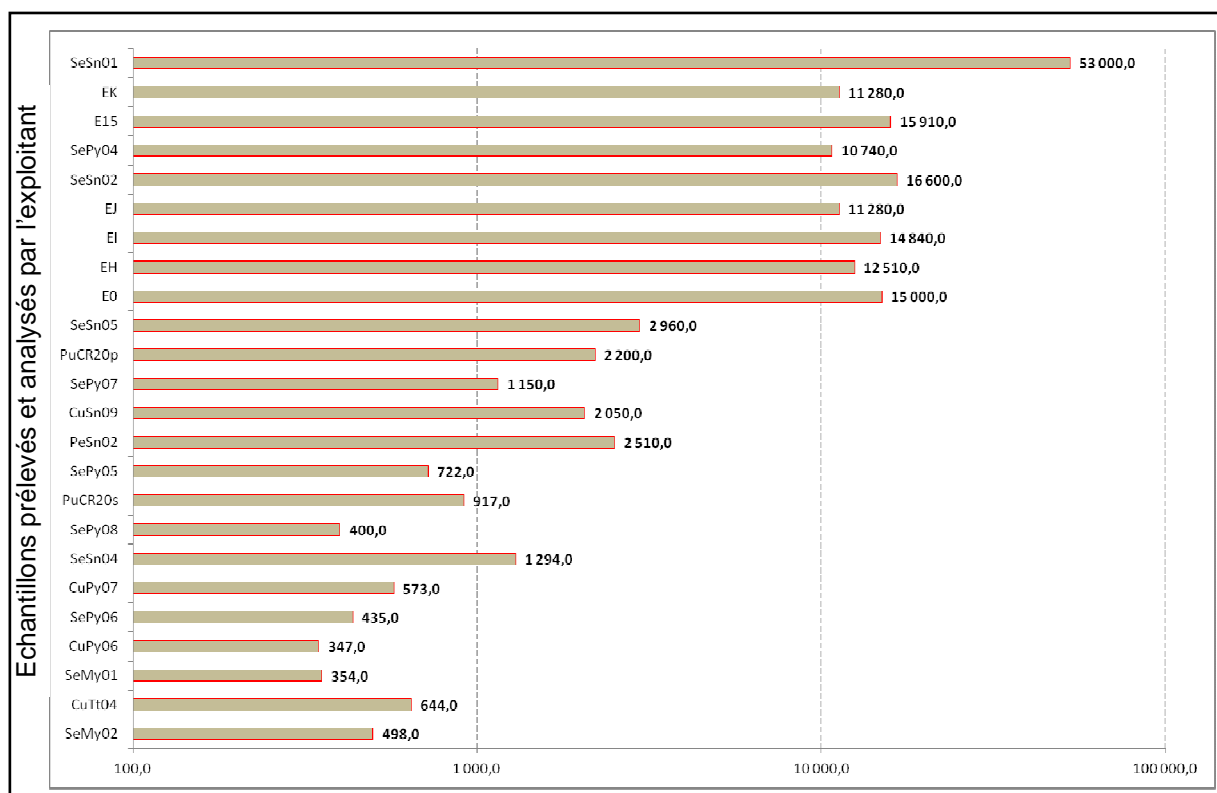


Figure 37 : Diagramme de conductivités électriques (en $\mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$) aux différents points d'eau prélevés en juin 2012 par l'exploitant

Les deux groupes d'eaux les moins minéralisées présentent des conductivités qui résultent d'interactions avec les roches présentes naturellement dans les zones aquifères du sous-sol. Ces variations naturelles de minéralisation des eaux souterraines sont liées à la nature géologique des terrains constituant l'aquifère. On trouve des eaux en provenance du plateau et drainées par des aquifères carbonatés karstiques, il s'agit des eaux les moins minéralisées de la région de Poligny avec des conductivités inférieures à $1000 \mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$. Le second groupe d'eaux, affichant des conductivités supérieures à $1000 \mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$, regroupe les sources et émergences qui drainent naturellement les terrains perméables du Trias au niveau des horizons gréseux (Rhétien) ou dolomitiques au sein des marnes irisées, altérées du fait de leur présence à l'affleurement.

Les deux groupes d'eaux les plus minéralisées sont le résultat de l'influence de l'exploitation du sel à deux degrés d'intensité différents. Le premier concerne les sources de la forêt de Vaivres dont les paramètres sont suivis régulièrement par l'exploitant : la teneur en sel y varie suivant les émergences et la période de l'année entre $4 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$ et $20 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$. Le second a été rencontré au niveau d'un épanchement d'eau saumâtre qui s'étend sur une surface en bordure ouest de la forêt de Vaivres : les analyses réalisées révèlent que la concentration en sel dépasse les $20 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$. Les flux de cette zone de percolation paraissent faibles mais sont difficiles à évaluer étant donné la nature diffuse de l'écoulement.

7.2.2 APPORT DE L'ÉTUDE DES ÉLÉMENTS MAJEURS

Afin d'identifier l'origine de ces différences de minéralisation nous allons utiliser la composition en éléments majeurs analysée au cours des différentes campagnes citées plus haut. Les investigations les plus complètes menées sur les eaux datent

de juin 2012. Des prélèvements ont été réalisés de manière quasiment exhaustive sur l'ensemble des cours d'eau, plan d'eau, sources, suintements et émergences diffuses. Les résultats des analyses sont présentés dans le diagramme de Piper en Figure 38.

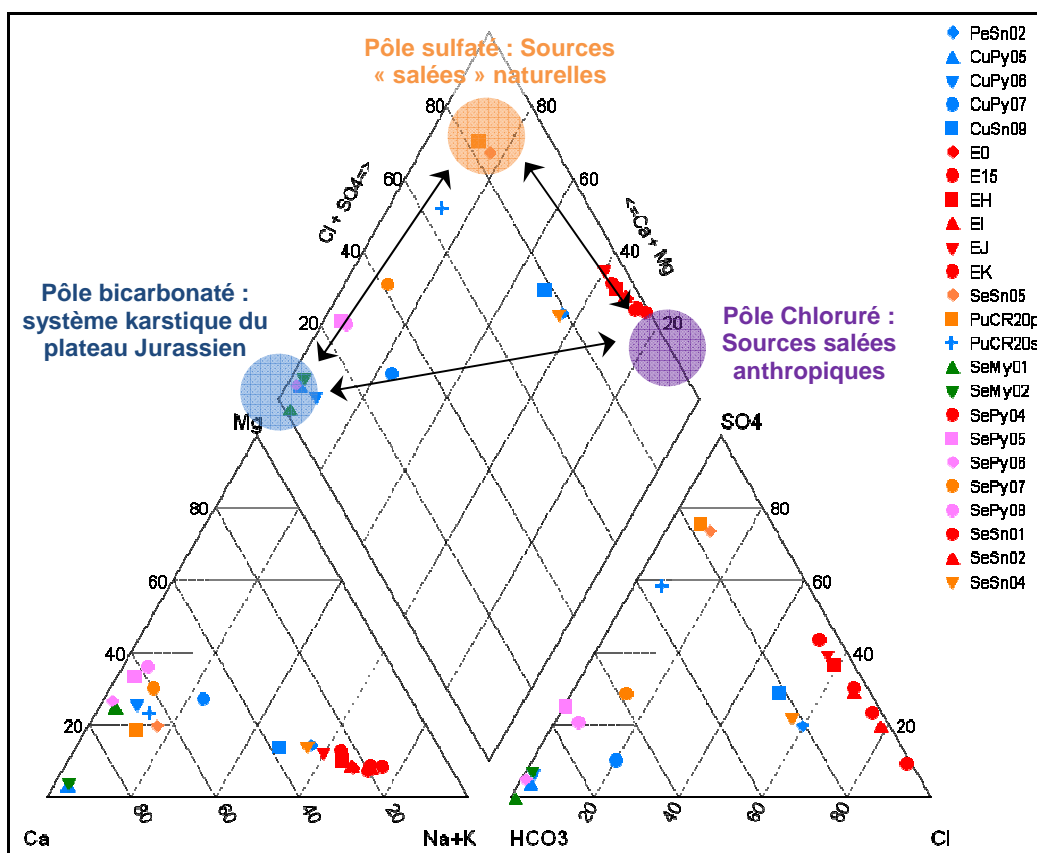


Figure 38 : Répartition dans un diagramme de Piper des échantillons prélevés en juin 2012 sur une grande partie des cours d'eau, plans d'eau et sources de la région de Poligny

Les échantillons analysés se répartissent suivant deux pôles naturels qui sont :

- le pôle bicarbonaté calcique, correspondant aux eaux drainées par le plateau calcaire jurassien et alimentant entre autre les ruisseaux de l'Orain et de la Glantine. Lors des périodes pluvieuses un certain nombre d'écoulements de sub-surface en provenance de la bordure du plateau ont cette signature chimique. Cette famille d'écoulement correspond au groupe d'eau ayant les conductivités électriques les plus faibles, inférieures à $1000 \mu\text{s}.\text{cm}^{-1}$. Les ions majoritaires sont les ions bicarbonates (70%) et calcium (20% ; voir Figure 39a et Figure 40) ;
- le pôle sulfaté calcique : il est représenté par les eaux drainées au niveau des horizons dolomitiques des terrains du Trias, l'espèce majoritaire est représentée par les sulfates (50% de la minéralisation totale) mais on trouve également du calcium (17%) et des bicarbonates (14%). Les ions sodium et chlorures sont présents et en concentrations plus importantes que pour le pôle bicarbonaté (13% de NaCl) (Figure 39b). Ce faciès est produit par la circulation des eaux souterraines au contact des marnes bariolées (Figure 40) du Trias supérieur qui sont riches en gypse, anhydrite et dolomie.

A ces deux pôles présents naturellement sur le site, s'ajoute un pôle apparu avec l'exploitation :

- un pôle chloruré sodique très riche en chlorures (50% de la minéralisation totale) en sodium (25 %) ainsi qu'en sulfates (15% ; voir Figure 39c). Ce faciès chimique caractérise des eaux drainées par les sources créées par l'exploitation au niveau des horizons dolomitiques, lesquels ne devaient initialement drainer que de faibles flux d'eau de faciès sulfaté calcique. Le faciès chloruré sodique identifié ici est caractéristique de la nappe salée qui s'est développée au contact du sel en profondeur, en lien avec l'exploitation du sel par dissolution (Figure 40) ;

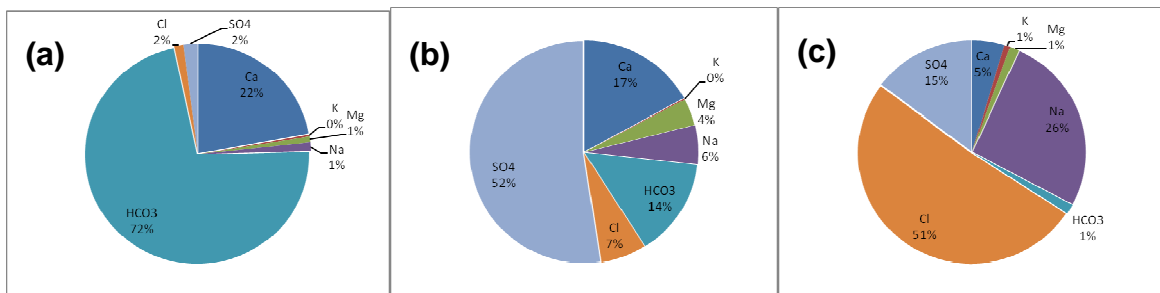


Figure 39 : (a.) Composition en ions majeurs de l'Orain à Poligny en amont de l'exploitation de sel par dissolution (b.) Composition en ions majeurs de la source salée de Saint-Lothain ; (c.) Composition en ions majeurs de la source salée Ek

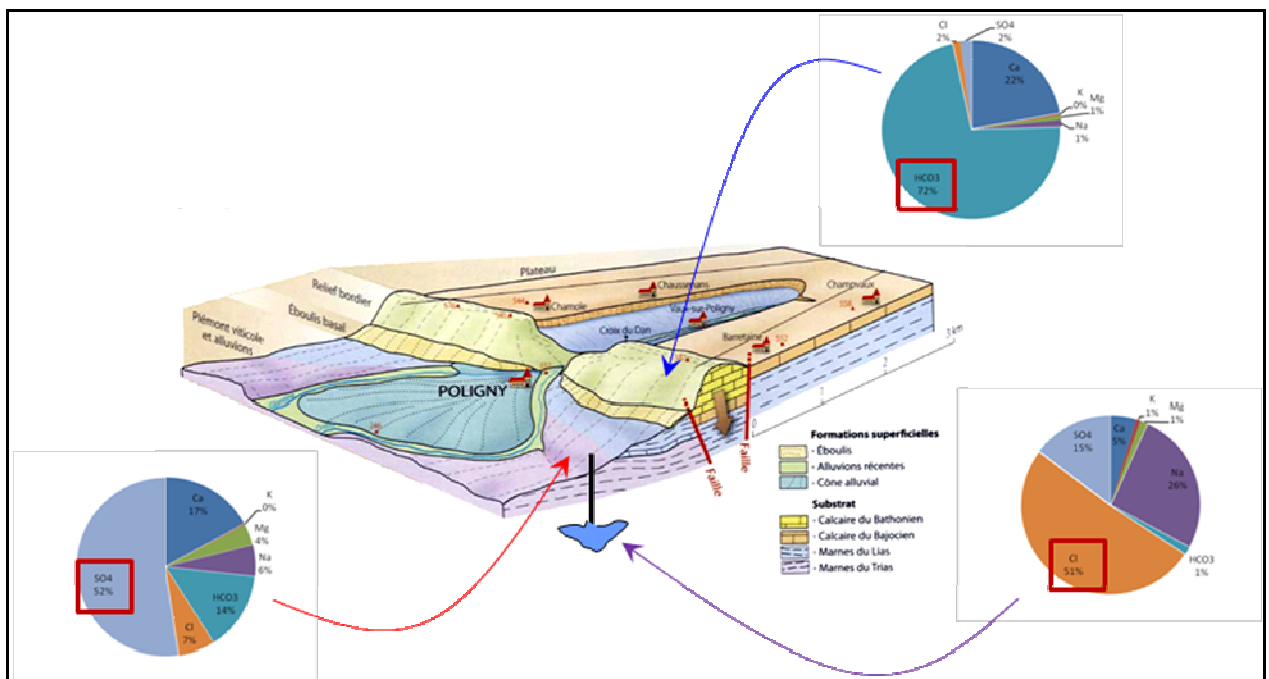


Figure 40 : Localisation géologique et morphologique des différents faciès chimiques identifiés

On observe donc une polarisation importante des faciès chimiques des eaux souterraines locales. Le pôle anthropique lié à l'exploitation influence fortement le faciès chimique des eaux souterraines (à proximité de l'exploitation) et des eaux superficielles, jusqu'en aval de l'exploitation (Figure 2).

7.3 INFLUENCE SUR LES EAUX DE SURFACE

La Figure 41 permet d'apprécier l'influence des différents faciès chimiques d'eaux souterraines sur celui de l'Orain. Elle montre la répartition des échantillons prélevés en juillet 2016. On retrouve les principales sources salées ainsi que les cours d'eau alimentés par ces sources qui se répartissent entre le pôle sulfaté calcique (source salée de Saint-Lothain) et le pôle chloruré sodique. Le point prélevé à l'amont de l'exploitation dans l'Orain est localisé au niveau du pôle bicarbonaté. L'échantillon prélevé au sud de Tourmont, après la confluence avec le Son est localisé au niveau du pôle chloruré sodique. L'eau de l'Orain voit donc son faciès chimique se déplacer du pôle bicarbonaté calcique vers le pôle chloruré sodique après avoir reçu un premier apport d'eau en provenance des sources salées de la forêt de Vaivres. L'échantillon situé à l'aval de la zone d'influence de l'exploitation « Orain aval » se déplace vers le pôle sulfaté calcique tout en restant très influencé par le pôle chloruré sodique. Ceci est la conséquence des apports en provenance des niveaux dolomitiques présents sur le bassin versant et des sources salées naturelles (Bief salé et sources salées de Saint-Lothain).

Sur la Figure 41, nous avons replacé la position approximative de ces deux échantillons, prélevés à différentes hauteurs sur le bassin versant amont de l'Orain, dans le cas où les eaux subirait uniquement l'influence du pôle sulfaté naturel sans influence anthropique.

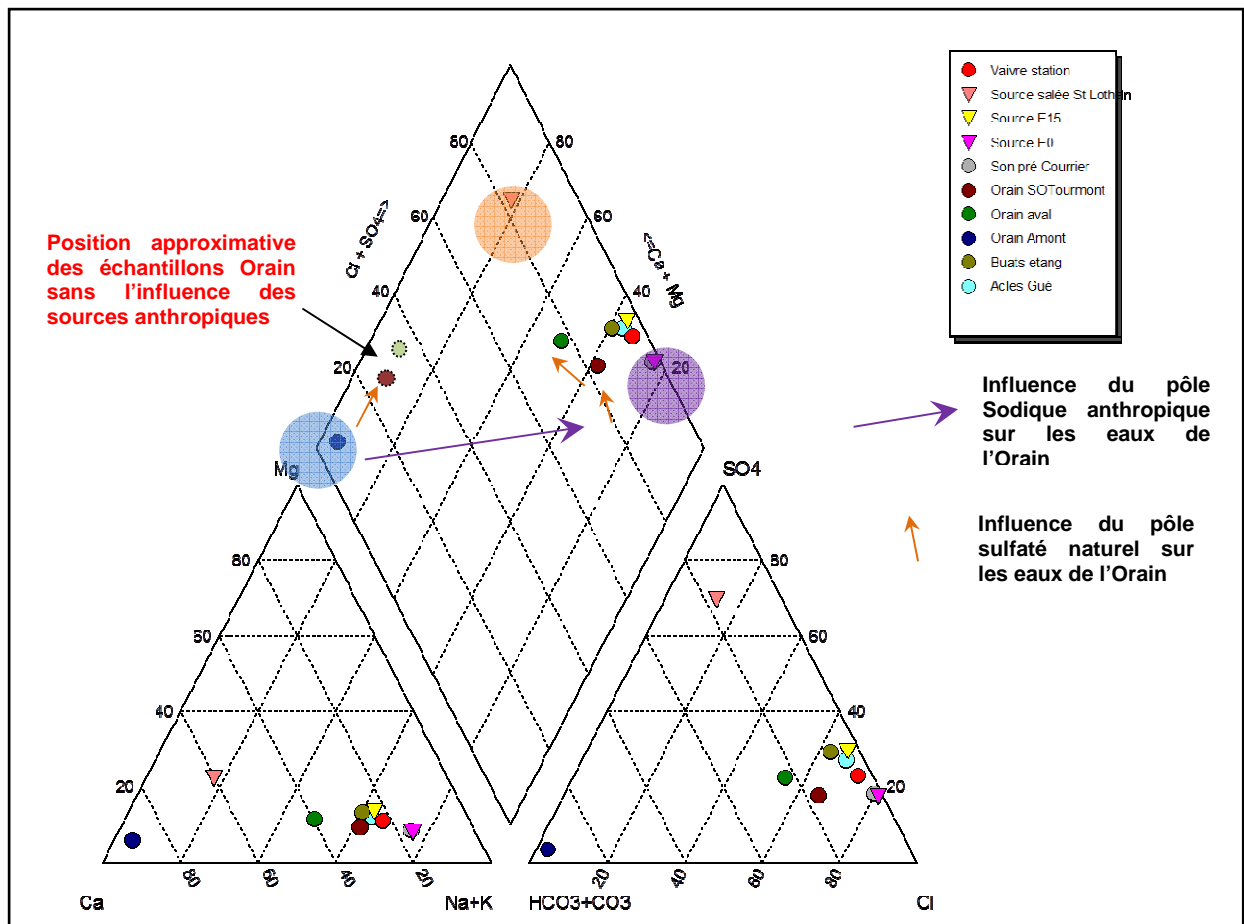


Figure 41 : (a.) Représentation des prélèvements effectués en juillet 2016 sur les sources salées et les piézomètres de l'exploitation atteignant la dolomie 2 m et 10 m

Les mesures réalisées montrent que l'exploitation de sel influence les faciès chimiques des eaux de surface, ce qui signifie que la répartition des concentrations des différents éléments chimiques change du fait des apports des sources liées à l'exploitation. Ceci laisse présager une salinisation des cours d'eau dont l'ampleur, la spatialisaton et l'impact environnemental seront étudiés et détaillés plus en avant dans ce document.

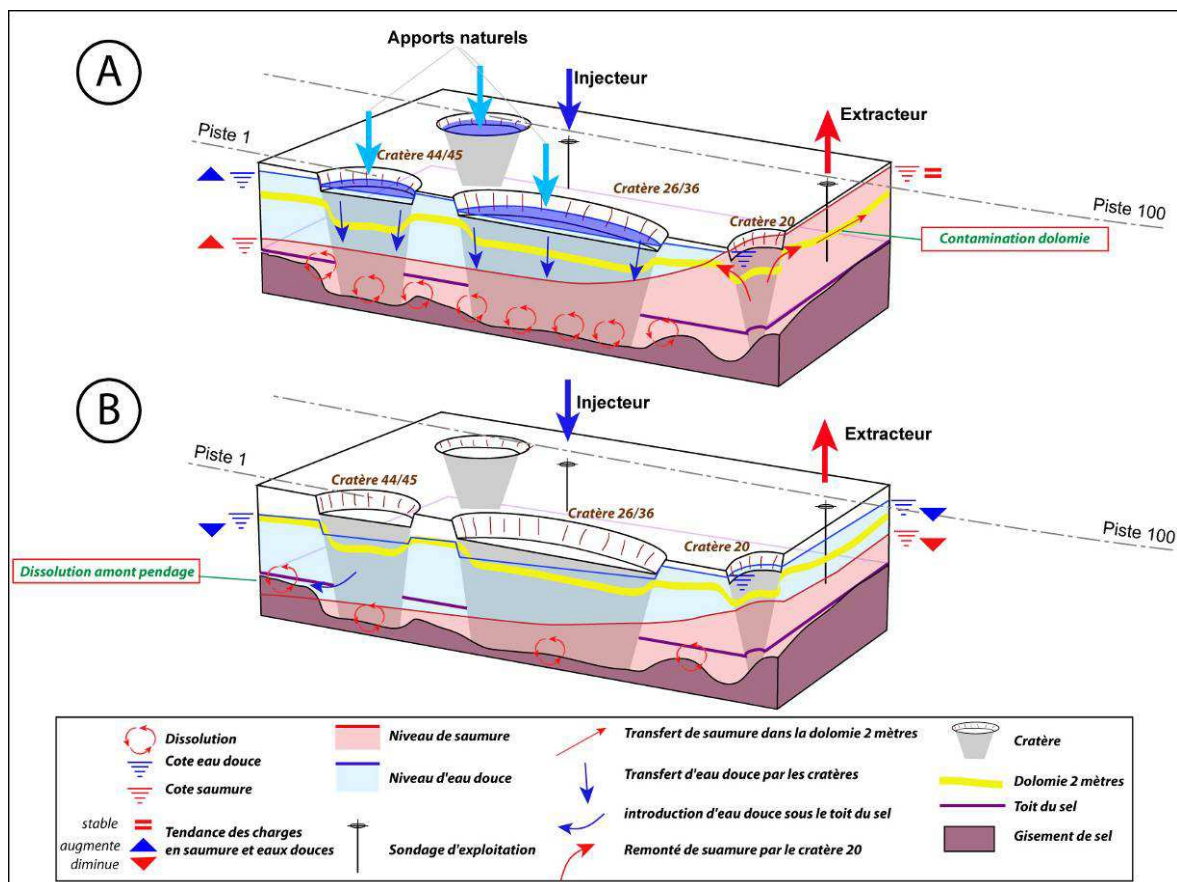
8. FONCTIONNEMENT HYDROGÉOLOGIQUE ANTHROPISE

8.1 HYPOTHÈSES DE FONCTIONNEMENT

8.1.1 PREMIÈRES HYPOTHÈSES SUR LE FONCTIONNEMENT DU SYSTÈME DE POLIGNY

Jusqu'en 2014, la formation des sources salées et leurs variations de salinité dans le temps étaient expliquées (Combes et Ledoux, 1998 et 2001) par des apports de sel en provenance de l'exploitation via le niveau drainant de dolomie 2 m.

Ainsi, on expliquait les variations de salinisation de ces sources par une succession de « bouffées de sel » transitant depuis la partie nord de l'exploitation (partie aval de la piste 1 au niveau du cratère 20) vers les sources de la forêt de Vaivres par l'horizon de dolomie 2 m. Ces injections d'eau salée dans le niveau drainant étaient attribuées à la zone exploitée, lorsque à l'occasion de situations d'exploitations particulières, le niveau de l'interface eau douce/saumure atteignait une cote suffisante pour affecter le niveau de dolomie. Le schéma présenté en Figure 42A illustre ce mécanisme, tel qu'il était imaginé dans le site en cours d'exploitation.



8.1.2 MÉCANISME D'ALIMENTATION DES SOURCES SALÉES

8.1.2.1 APPORT DES INVESTIGATIONS RÉCENTES RÉALISÉES PAR L'EXPLOITANT

En 2015, un certain nombre d'investigations complémentaires a été réalisé par l'exploitant. Deux doublés de piézomètres ainsi que des piézomètres complémentaires à proximité d'ouvrages déjà existants ont été forés. Il s'agit, pour les doublets, des ouvrages Pz 1.1 et Pz 1.2, Pz 2.1 et Pz 2.2 et RL58, AM5bis et AM4bis (Figure 2). Ces travaux de forage ont été suivis d'investigations de la conductivité électrique des différents piézomètres. Ces mesures ont révélé que la salinité des niveaux de dolomie 2 m dans le secteur de l'exploitation est relativement faible (maximum de $2,4 \text{ ms.cm}^{-1}$ pour Pz1.2) comparée aux exutoires salés de la forêt de Vaivres, tout en ayant un faciès chimique caractéristique des niveaux dolomitiques influencés par les eaux en provenance de la nappe salée (Figure 43). Cet horizon aquifère ne peut donc pas être à l'origine des eaux plus salées s'écoulant aux sources ($> 15 \text{ ms.cm}^{-1}$). L'augmentation de la minéralisation dans cet horizon s'est faite *via* les zones effondrées mais les niveaux de minéralisation qui en résultent sont inférieurs à ceux des sources salées.

Les conductivités électriques mesurées dans la dolomie « 10 mètres » atteignent $31,3 \text{ ms.cm}^{-1}$ pour Pz1.1, $55,8 \text{ ms.cm}^{-1}$ pour AM 3 et au maximum 10 ms.cm^{-1} pour AM 4, AM 5, AM 6 et AM 7 (Annexe 11). Les minéralisations relevées au sein de la dolomie « 10 mètres » sont quant à elles, en mesure d'expliquer les concentrations en sel mesurées aux sources. On observe notamment Figure 43 que l'eau prélevée dans le piézomètre 1.1 est très proche de la source E₁₅ en termes de faciès chimique et que sa minéralisation est en mesure d'expliquer celle mesurée aux sources.

La dolomie « 10 mètres » constitue donc le réservoir d'origine des fluides drainés aux sources. Au faciès chimique sulfaté originel sont venus se mélanger des fluides en provenance de la nappe salée sous-jacente induite par l'exploitation. Ce transfert s'est fait *via* les zones effondrées. Il convient donc d'étudier maintenant les modalités de transfert des fluides identifiés vers les sources depuis la dolomie 10 m. L'extension de ce réservoir est difficile à délimiter. Les connaissances acquises jusqu'à présent n'ont répertorié que les sources salées comme exutoire de ce système. Afin de dresser un schéma de circulations d'eau cohérent, il est d'abord nécessaire d'identifier le fonctionnement hydrogéologique qui existait avant l'apparition des premières modifications structurales liées à l'exploitation.

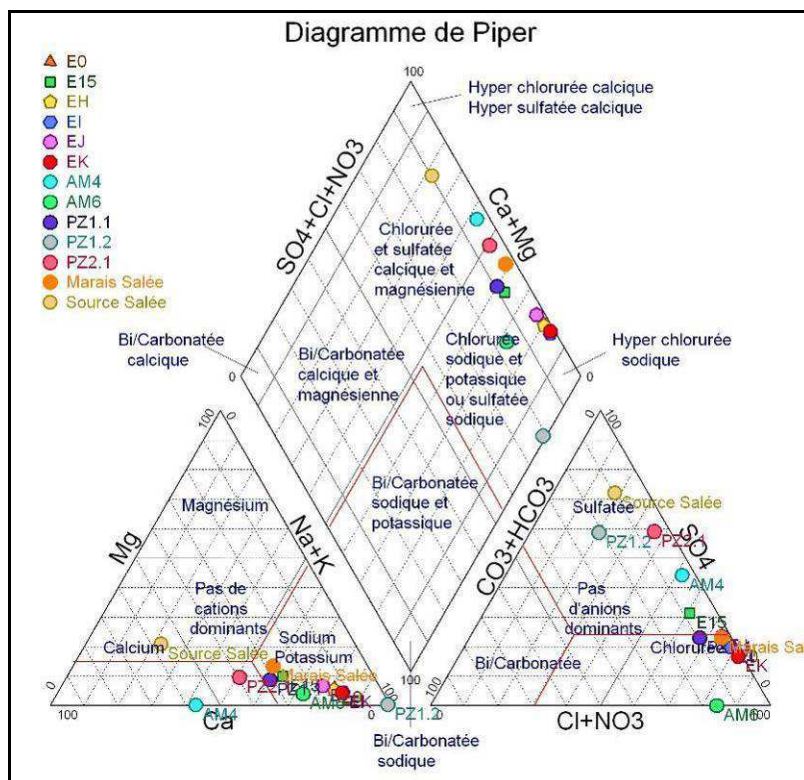


Figure 43 : Diagramme de piper réalisé en 2014 par l'exploitant, présentant les analyses réalisées sur les principaux exutoires salés et les nouveaux ouvrages d'accès aux nappes réalisés en 2014 (des erreurs d'analyse engendrent un mauvais positionnement des points Pz 1.2 ; AM 4 et AM6)

8.1.2.2 SCHÉMA DE FONCTIONNEMENT HYDROGÉOLOGIQUE PRÉ-EXPLOITATION

Les coupes géologiques réalisées sur le secteur montrent une structure générale de la zone concernée par l'exploitation en « touches de piano ». Un certain nombre de failles d'orientation nord-sud, pouvant être parfois chevauchantes, décalent différents compartiments de terrains verticalement, les uns par rapport aux autres (Figure 44). En termes hydrogéologiques, il en résulte un compartimentage de la zone.

Avant la mise en place des premiers effondrements liés à l'exploitation du sel par pistes effondrables, l'infiltration dans la zone concernée par la concession était très réduite, étant donné la faible perméabilité des terrains présents à l'affleurement (principalement des marnes irisées du Trias). En période de hautes eaux, seule la zone superficielle altérée des marnes infra-gypseuses devait jouer un rôle de stockage hydrogéologique et restituer un écoulement de manière intermittente. Etant donné la structure géologique de la zone, nous interprétons la présence de la source salée de Saint-Lothain par des circulations d'eau qui transitent de la surface vers le niveau de dolomie 10 m. Dans ce secteur, situé à l'ouest de l'exploitation, le jeu des failles amène cet horizon à l'affleurement. Depuis la surface, l'eau transite *via* des zones dont la perméabilité a été augmentée par la présence des discontinuités géologiques. Les circulations se font ensuite de l'est vers l'ouest, *via* la dolomie 10 m, jusqu'à l'exutoire situé dans la zone d'affleurement de cette formation, à l'ouest de la forêt de Vaivres. Le

gradient nécessaire à l'écoulement est imposé par la différence de cote entre la zone d'infiltration et la source.

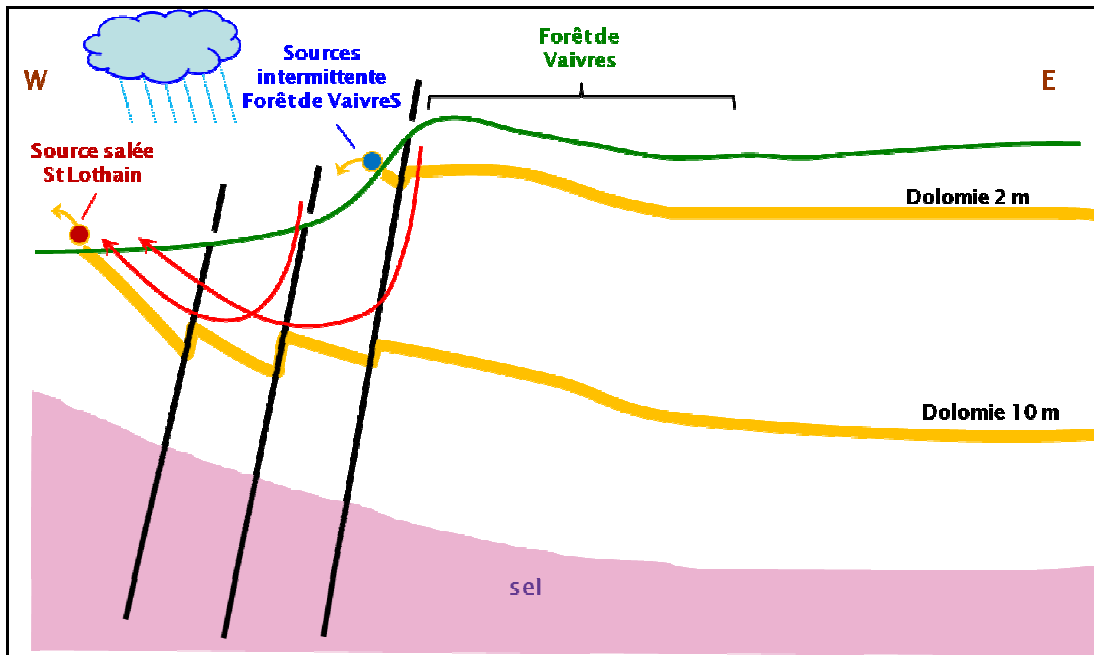


Figure 44 : Coupe schématique E-W présentant le contexte hydrogéologique de la zone étudiée avant le développement de l'exploitation de sel par dissolution

8.1.2.3 SCHÉMA DE FONCTIONNEMENT ACTUEL

Les effondrements liés à l'exploitation ont rendu perméable la zone des marnes irisées situées au-dessus de la dolomie « 2 mètres », initialement imperméable, localisée à l'est sur la Figure 44. De l'eau douce s'est infiltrée au toit du sel et une nappe salée s'y est développée. La saumure produite a atteint les terrains sus-jacents et l'horizon de dolomie 10 m. Les ouvertures successives de la zone exploitée par le développement des effondrements ont permis la mise en place d'un bassin versant suffisant pour imposer une charge hydraulique dans le milieu souterrain, qui dépasse la cote des sources de la forêt de Vaivres. Les failles qui découpent le système ont alors permis le transit vertical de l'eau contenue dans la dolomie 10 m vers le niveau de dolomie 2 m, ce qui a amené à la formation des sources salées de la forêt de Vaivres (Figure 45). Le débit et la salinité des sources salées ont ensuite fluctué au cours de l'histoire de l'exploitation au gré des changements du régime d'exploitation et de l'histoire du site. Nous allons maintenant détailler ces fluctuations afin de proposer des hypothèses quant à l'évolution future du site.

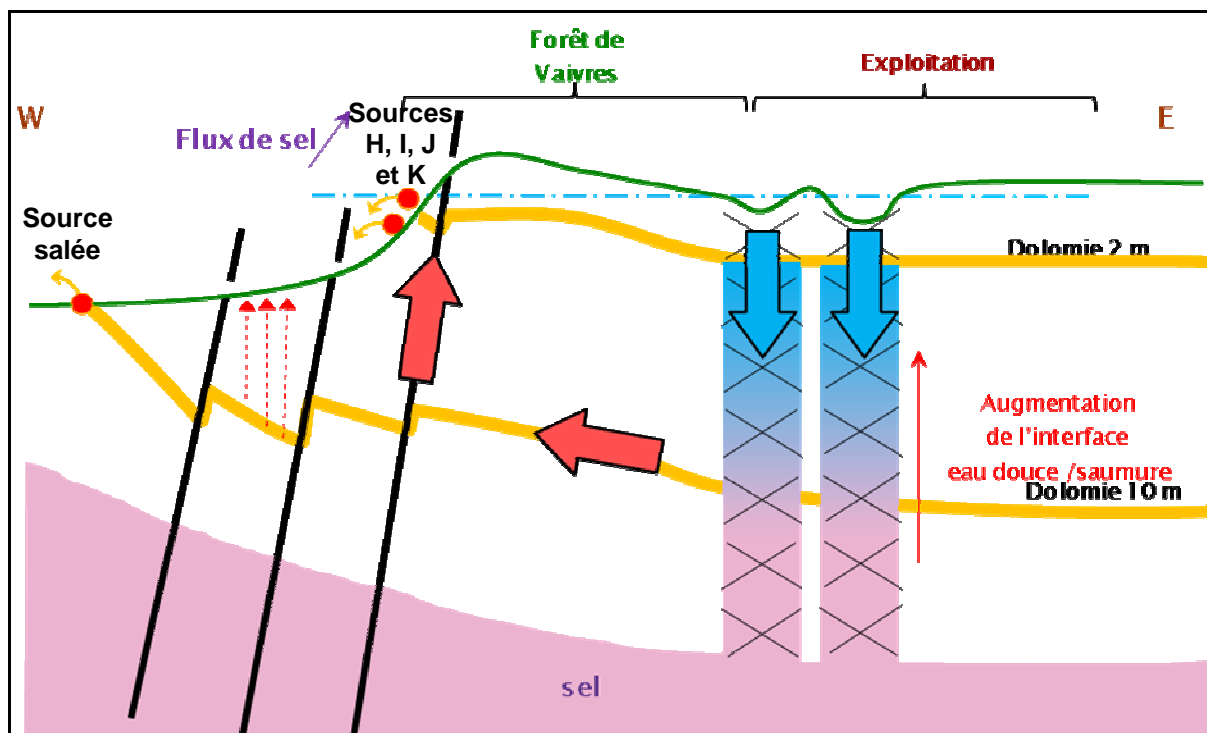


Figure 45 : Schéma hydrogéologique de fonctionnement supposé du site de Poligny

8.2 EVOLUTION DES EXUTOIRES SALÉS AU COURS DU TEMPS

8.2.1 ANALYSE DES DIFFÉRENTES PHASES D'ÉVOLUTION HYDROGÉOLOGIQUES

Nous disposons des suivis réalisés par l'exploitant au niveau des sources $E_{H,I,J,K}$, E_0 et E_{15} depuis 1997 jusqu'à aujourd'hui (Annexe 12, Annexe 13, Annexe 14, Annexe 15, Annexe 16 et Annexe 17). Ces suivis comprennent une mesure bimensuelle de débit et de concentration en chlorures. Ils permettent une analyse du comportement de ces exutoires et autorisent d'avancer des hypothèses quant au fonctionnement de ce système hydrogéologique anthropisé.

- Avant 1997 :

Comme mentionné Figure 11 les suivis de débits et salinité aux sources ont montré des augmentations successives par paliers, correspondant à l'apparition progressive des effondrements au fur et à mesure de la création des pistes. L'augmentation du nombre d'effondrements, notamment des pistes les plus récentes, a artificiellement agrandi le bassin versant d'alimentation des différentes sources salées. L'ouverture du système a permis à plus d'eau de s'infiltrer et le débit des sources a donc augmenté.

- Entre 1997 et 2011 :

On observe une stabilisation des débits, le système trouve progressivement un régime permanent sans nouvelles augmentations de débit. La profondeur de l'interface eau douce / saumure diminue progressivement d'où la diminution puis la stabilisation des concentrations aux sources. Pour ces différentes sources, le débit adopte une évolution cyclique avec une période de hautes eaux à la fin du printemps et au début de l'été et une période de basses eaux en hiver. L'ensemble des débits des sources montre un comportement similaire qui se calque sur les

évolutions de charges hydrauliques au niveau des pistes exploitées. Le débit de la source E_k reste faible comparé aux autres exutoires et ne présente pas de variations cycliques (Annexe 15).

Du point de vue de la minéralisation, les concentrations en chlorures mesurées aux sources durant cette période diminuent de manière régulière pour atteindre un niveau pseudo stabilisé, notamment en ce qui concerne le groupe de sources $E_{H,I,J,K}$. La tendance est moins nette pour la source E_0 et la source E_{15} pour lesquelles les concentrations ne sont pas encore stabilisées.

Avant l'arrêt de l'exploitation, les débits des sources sont stabilisés et la concentration en chlorures a constamment diminué depuis la fin des années 90 pour atteindre un niveau constant sur la plupart des exutoires : environ 2 g.L^{-1} de chlorures pour E_H ; $2,5 \text{ g.L}^{-1}$ pour E_I ; $2,5 \text{ g.L}^{-1}$ pour E_J et $3,5 \text{ g.L}^{-1}$ pour E_k .

- Depuis 2011 :

Mis à part pour la source E_0 qui a vu son débit multiplié par deux, l'arrêt de l'exploitation en février 2011 a eu peu d'effet sur l'évolution des débits de sources. A contrario, dès l'arrêt de l'exploitation les concentrations en chlorures, qui ne présentaient pas jusque-là d'évolution à l'échelle d'une année, ont adopté une cyclicité calquée sur les débits pour l'ensemble des sources. En 2011 et 2012, ce cycle annuel s'est fait autour d'une concentration moyenne en chlorures constante et équivalente à la valeur de fin d'exploitation. Mais depuis 2013, excepté pour E_{15} , c'est ajouté à cette cyclicité une augmentation des concentrations. Le maximum annuel est toujours plus élevé d'année en année ainsi que le minimum annuel. L'analyse du flux de chlorures global drainé par les sources permet de bien visualiser cette tendance sur les dernières années depuis l'arrêt de l'exploitation (Figure 46).

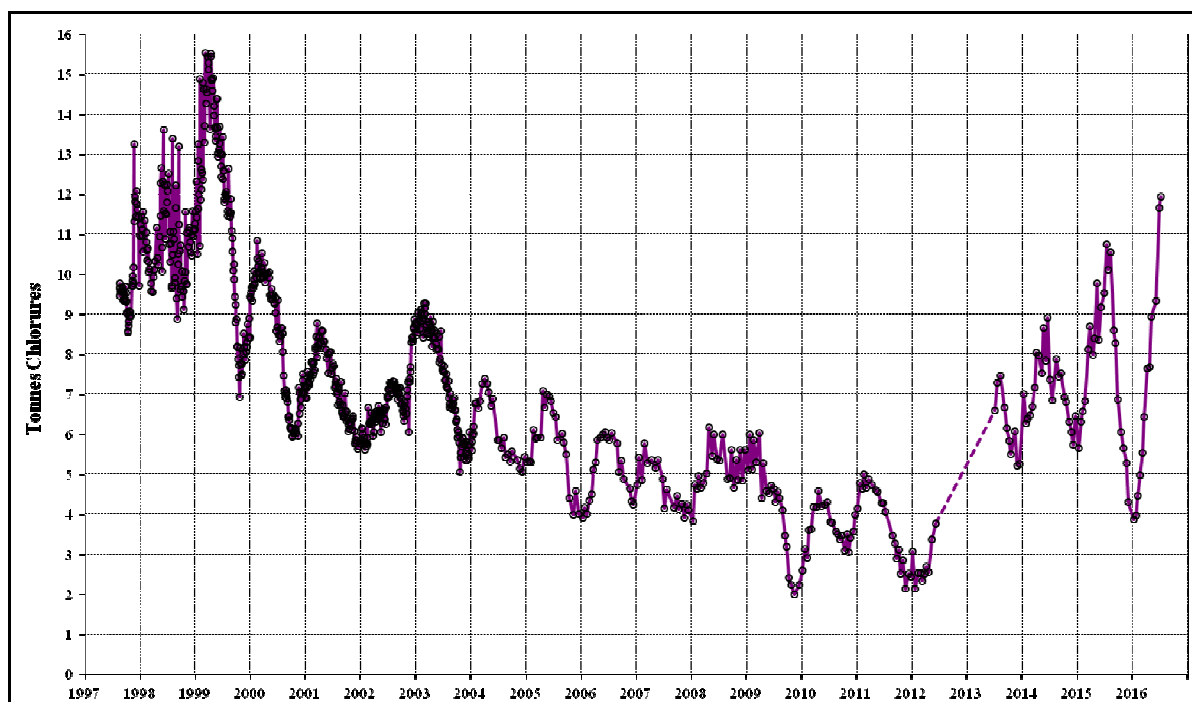


Figure 46 : Evolution du flux *journalier* de chlorures mesuré sur l'ensemble des exutoires salés en marge de l'exploitation de sel de Poligny entre 1997 et 2016

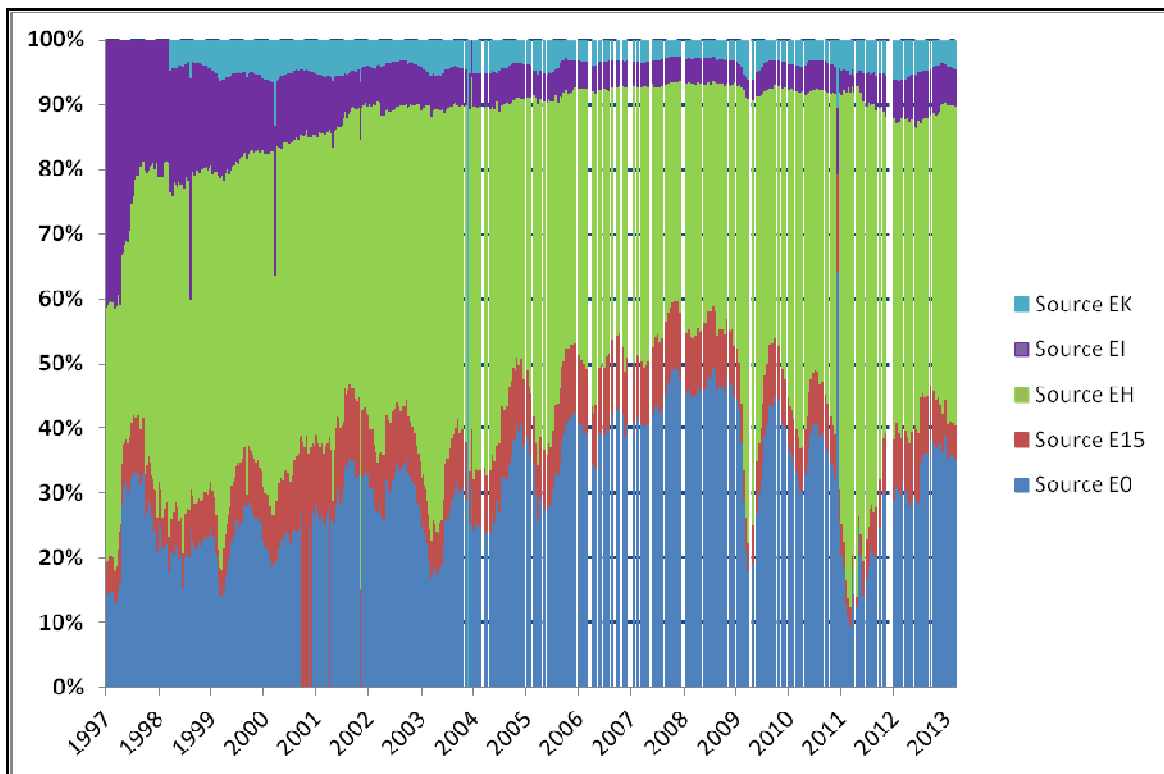


Figure 47 : Participation (en %) des différents exutoires (à l'exclusion de la source J) au flux total de chlorures entre 1997 et 2013

L'analyse du flux de chlorures sur la période 1997-2013 permet de mettre en évidence une évolution progressive du système de drainage du flux de sel. En effet, si l'on représente la participation des différentes sources au flux de sel total (Figure 47), on observe une augmentation de la participation des sources E₀ (+13%) et E₁₅ (+2%) alors que les autres exutoires E_H, I, J, K voient leur contribution diminuer.

Ce dernier groupe de sources est localisé à l'ouest de la forêt de Vaivres alors que les sources E₀ et E₁₅ émergent sur la bordure nord de cette même forêt (Figure 2). Depuis l'arrêt de l'exploitation, l'axe de drainage vers le nord voit augmenter sa contribution, bien que l'axe de drainage ouest reste celui qui draine le flux de sel le plus important (60% au total).

8.2.2 FONCTIONNEMENT ACTUEL

Depuis février 2011 et l'arrêt de l'exploitation, il est possible de relever les faits suivants :

- une augmentation régulière des concentrations couplée à l'augmentation de débit de la source E₀. Ces évolutions font que le flux de sel augmente progressivement chaque année à la fin du printemps. Les niveaux atteints durant l'été 2016 n'avaient pas été mesurés aux sources depuis 1999 ;
- l'augmentation de salinité mesurée sur tous les exutoires, excepté E₁₅, témoigne d'une augmentation de la salinité dans le réservoir ;
- les augmentations de débit sont synchrones des augmentations de concentrations en sel, elles même synchrones des variations de charges ;

- les suivis d'affaissement ne montrent pas de déplacements de la surface du sol qui pourraient révéler une activité de la nappe salée dans les zones encore accessibles et suivies par des mesures de nivellement.

Depuis la fin de l'exploitation, plus aucun fluide n'est soutiré au système. L'absence de soutirage de saumure a induit une augmentation de la salinité dans les zones effondrées et les niveaux drainant du Trias, et donc une augmentation de la cote de l'interface eau douce/eau salée. Cette évolution récente du système se manifeste par une augmentation de la salinité de l'eau drainée par la dolomie 10 m qui se répercute aux sources. Pour le groupe de sources E_{H,I,J,K} la salinité de l'eau semble avoir atteint une nouvelle valeur stabilisée, les minima annuels pour les différents exutoires étant du même ordre de grandeur d'une année sur l'autre. Au contraire l'augmentation se poursuit sur la source E₀, ce qui explique en majeure partie l'évolution du flux de chlorures observé en Figure 46.

Nous expliquons les évolutions mesurées sur la source E₀ par sa position altitudinale plus élevée (290,6 m) que celle du groupe de sources E_{H,I,J,K} (282 m). La remontée générale des interfaces depuis la fin de l'exploitation a induit des modifications au niveau de la concentration et du débit de cette source, cette dernière étant impactée de manière moins importante quand les interfaces sont plus basses. L'augmentation de charge dans la zone effondrée ne semble, étant donné les mesures réalisées, ne pas avoir d'effet sur le débit du groupe de sources E_{H,I,J,K}. Il est possible que les mesures manuelles du débit réalisées n'aient pas une résolution suffisante pour mettre en évidence la variation induite.

Les observations présentées ci-avant sous-entendent que la nappe salée est toujours active en termes de dissolution. L'absence de mouvements de terrains en surface ne permet pas de localiser cette zone active qui se trouve probablement dans la zone des nouvelles pistes (non surveillée en termes d'affaissements). Avant 2014 et l'arrêt des mesures, le suivi des affaissements par nivellement montrait très clairement des mouvements de terrain dans ce secteur.

Pour synthétiser, il semblerait que le système soit en passe d'atteindre un nouvel équilibre hors exploitation. L'arrêt du soutirage de saumure a induit en premier lieu :

- une augmentation de la minéralisation du système, une partie du sel produit par les mécanismes de dissolution n'étant plus retiré du système ;
- dans une moindre mesure une augmentation de charge hydraulique qui s'est manifestée à la source E₀ par une augmentation de débit qui se poursuit et la formation d'un nouvel exutoire à proximité des sources E_{H,I,J,K} ;

Il en résulte une augmentation générale du flux de sel vers l'environnement.

8.2.3 EVOLUTIONS POSSIBLES DU FLUX DE SEL AUX SOURCES

Il n'est pas possible dans l'état actuel des connaissances du sous-sol de ne proposer qu'une seule hypothèse d'évolution du système de Poligny. Notre connaissance de ce système permet de proposer deux scénarios, si aucune nouvelle modification (par exemple, des effondrements de cavité) n'intervient :

- dans le premier cas, si la configuration du milieu souterrain permet la mise en place d'une zone de dissolution, liée à une circulation continue, avec maintien d'un apport d'eau douce au toit du sel, alors le système va évoluer jusqu'à atteindre un régime permanent stabilisé qui est peut-être déjà atteint sur certains exutoires. Les concentrations en sel vont se stabiliser dans la dolomie 10 m et donc aux sources, jusqu'à ce que la dissolution des terrains engendre de nouvelles évolutions du système ;
- dans le second cas, si l'eau salée produite par la nappe salée n'est pas évacuée, le système va se saturer progressivement. Dans cette configuration, la saturation du fluide au contact du sel bloquera progressivement les arrivées d'eau douce au toit du sel et aucun nouveau processus de dissolution ne se mettra en place. La minéralisation aux sources devrait donc atteindre un maximum qui sera suivi d'une lente décroissance des concentrations, jusqu'à ce que le sel accumulé dans la dolomie 10 m soit évacué.

Quel que soit le système existant, il apparaît que l'évolution actuelle est transitoire et liée à l'arrêt du soutirage de saumure qui existait pendant l'exploitation. Il en a résulté deux mécanismes :

- l'augmentation de la charge hydraulique dans le système ;
- la diminution de la profondeur de l'interface eau douce / saumure.

9. IMPACT SUR LES EAUX DE SURFACE

Afin d'évaluer l'impact des sources salées apparues en marge de l'exploitation de sel par dissolution de Poligny, une campagne de mesure et de prélèvements a été réalisée en juillet 2016. L'objectif de cette mission était double :

- réaliser une cartographie de la salinité des cours d'eau dans la partie amont du bassin versant de l'Orain concernée par l'exploitation de sel ;
- évaluer l'impact du sel présent dans les eaux sur les organismes vivants (invertébrés, vertébrés et algues).

9.1 PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

L'ensemble des cours d'eau du bassin versant a fait l'objet d'une campagne de mesures physico-chimiques qui s'est étendue du 5 au 7 juillet 2016. L'objectif était de couvrir de manière homogène l'ensemble des linéaires des cours d'eau, en portant une attention particulière à la mesure de la conductivité électrique, représentative de la minéralisation totale de l'eau. Tous les points de mesure ont été localisés par un relevé DGPS. Certaines mesures ont été complétées par un prélèvement destiné à une analyse des éléments majeurs. Ces prélèvements ont été réalisés sur des points de valeur de conductivités différentes afin de couvrir la gamme de minéralisation existante sur le bassin versant de l'Orain.

Un second type de prélèvement a été réalisé. Les 5 et 6 juillet 2016 sur 7 points de mesure communs aux précédents, 20 litres d'eau ont été prélevés et transmis (dans les 48 heures par glacière réfrigérée) au laboratoire d'écotoxicologie de l'INERIS. Des bio-essais normalisés ont ensuite été menés sur ces eaux. Les points de prélèvement sélectionnés correspondent à des stations IBGN (Indice Biologique Global Normalisé) suivies lors d'études commandées par l'exploitant au cours des années précédentes. Les bio-essais réalisés ont été les suivants :

- des essais sur des invertébrés, *Daphnia magna* et *Daphnia pulex* :
 - essai de toxicité aiguë : testant la mortalité (déterminée par l'inhibition de la mobilité) pour différentes concentrations. L'essai consiste à compter le nombre de daphnies immobiles pour différentes dilutions des échantillons d'eau après 24 ou 48 heures ;
 - essai de toxicité chronique : inhibition de la reproduction. On compte ici le nombre de pontes par daphnies pendant 21 jours pour différentes dilutions des échantillons d'eau.
- des essais de toxicité aiguë sur les algues *Pseudokirchneriella subcapitata* ; l'effet mesuré est l'inhibition de la croissance des algues au bout de 72 heures. Les tests ont été réalisés pour différentes concentrations ;
- des essais de toxicité aiguë sur les poissons *Danio rerio* (mortalité des poissons en 96 heures) à partir de l'échantillon d'eau le plus impactant identifié sur les espèces précédentes.

9.1.1 CONTEXTE DES INVESTIGATIONS

9.1.1.1 CONTEXTE HYDROLOGIQUE DES INVESTIGATIONS

Aucune mesure de débit n'a été réalisée lors des investigations. Actuellement aucune station n'est suivie sur l'Orain dans la zone d'étude. Une station hydrométrique a été suivie sur l'Orain à Deschaux à 15 kilomètres en aval du point le plus aval du bassin versant que nous étudions. Cette station a été active de 1968 à 1996.

Afin de replacer les investigations réalisées dans le contexte hydrologique du mois de juillet 2016 nous avons donc collecté sur la banque hydrologique (<http://www.hydro.eaufrance.fr>) les données mesurées le 6 juillet 2016 sur un certain nombre de cours d'eau de la bordure ouest du massif jurassien dans la zone du Revermont.

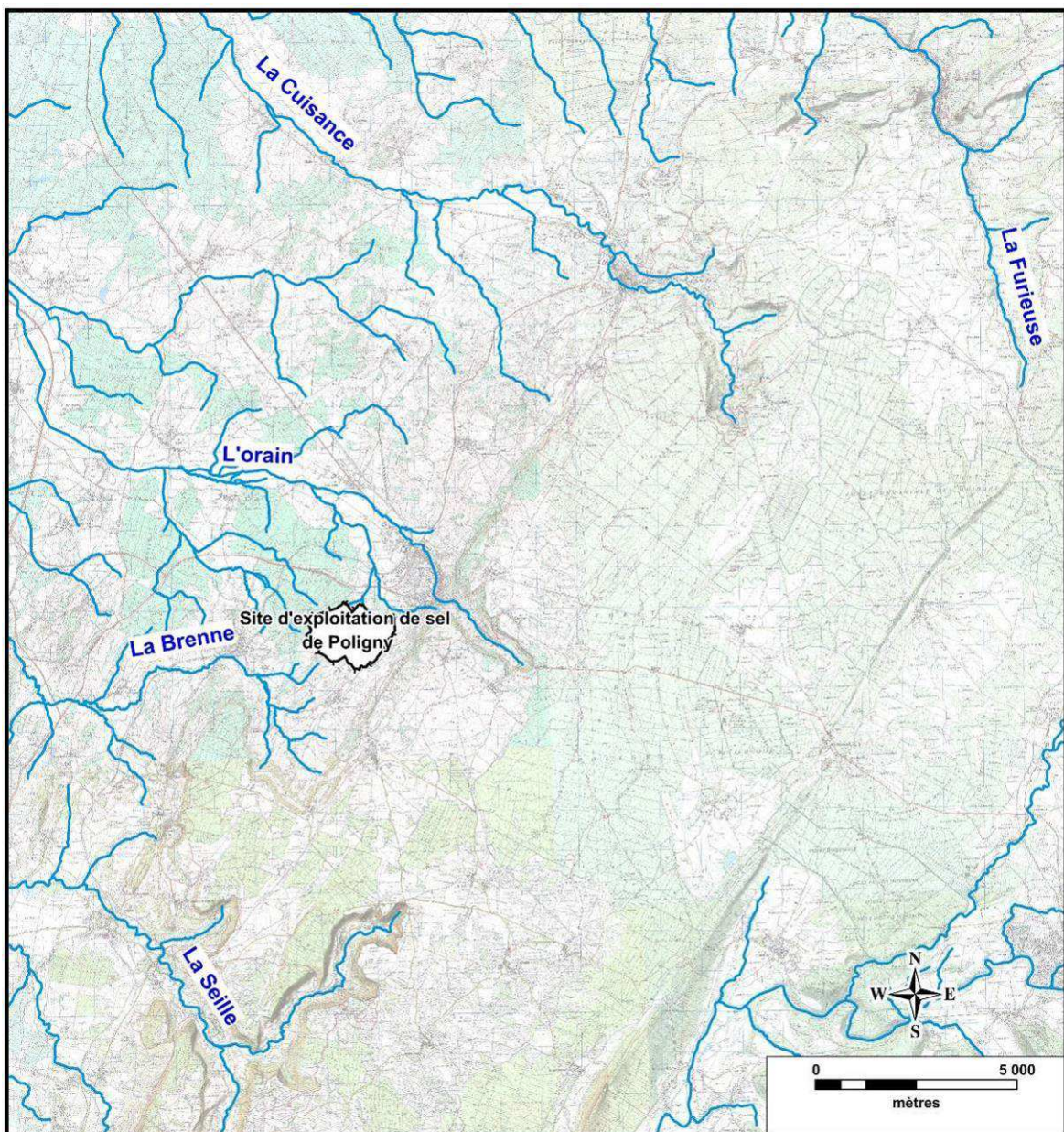


Figure 48 : Contexte hydrologique élargi de la bordure ouest du massif jurassien à hauteur de Poligny

Cette démarche a pour but de replacer nos investigations dans un contexte permettant d'apprécier les conditions hydrologiques du moment. Les débits des rivières localisées sur la Figure 48 ont été synthétisés dans le Tableau 8.

Tableau 8 : Surface de bassin versant, débit minimum connu ($m^3.s^{-1}$), module ($m^3.s^{-1}$) et débit le 6 juillet 2016 des principaux cours d'eau situés dans un contexte équivalent à celui de l'Orain : La Brenne à Sellière, La Seille à Voiteur, La Cuisance à Mesnay, La Furieuse à Salin-Les-Bains et l'Orain à Deschaux. Le débit pour cette dernière station a été calculé

	Surface BV km^2	Q min connu $m^3.s^{-1}$	Module $m^3.s^{-1}$	Q 06.07.2016 $m^3.s^{-1}$
Brenne	37	0,014	0,642	0,134
Furieuse	47,7	0,062	1,5	0,649
Cuisance	94,7	0,212	3,34	1,17
Orain	181	0,145	2,86	0,64

Le cours d'eau qui se rapproche le plus de l'Orain par rapport au contexte géologique et hydrogéologique local est la rivière de la Brenne. Ce cours d'eau draine le bassin versant situé au sud de celui de l'Orain et, comme ce dernier, il est en partie alimenté par des écoulements karstiques en provenance du premier plateau du Jura. Le contexte géologique de ruissellement est équivalent.

Le bassin versant de la Brenne à Sellière est de $37 km^2$ et lors de nos prélèvements son débit était de $0,134 m^3.s^{-1}$. Nous avons estimé la surface du bassin versant de l'Orain à hauteur de Brainans, au point le plus aval de nos investigations, à environ $90 km^2$ (soit la moitié du bassin versant de l'Orain à Deschaux au niveau de la station suivie de 1968 à 1996).

En se basant sur la similarité de contexte entre La Brenne et l'Orain nous avons calculé le débit de l'Orain de manière proportionnelle à celui de la Brenne en tenant compte d'une surface de bassin versant de $90 km^2$. Le débit ainsi obtenu serait de $0,326 m^3.s^{-1}$ au sud de Brainans. Dans l'objectif de fournir un cadre hydrologique contextuel, nous avons évalué à partir du diagramme des débits classés à Deschaux la fréquence de retour du débit de l'Orain en juillet 2016 lors de la réalisation de la cartographie de la salinité et des prélèvements pour les bioessais. Pour ce faire, le débit évalué de l'Orain au sud de Brainans a été multiplié par deux, le bassin versant au niveau de ces deux points variant du simple au double.

Ainsi, bien que les investigations aient été réalisées pendant l'un des deux mois affichant les débits moyens les plus faibles de l'année, le débit estimé au début juillet 2016 affiche une fréquence de retour de 0,34 (Figure 49). Ce débit ne correspond pas à un débit d'étiage, la fréquence de retour admise pour ce type de débit de référence étant de 0,0274 (<http://www.hydro.eaufrance.fr>).

Il apparaît donc lors des investigations réalisées en juillet 2016 que les conditions hydrogéologiques correspondaient à un débit pour lequel 34% du temps le débit est plus faible sur le bassin versant et 66% du temps il est plus élevé. Ceci signifie qu'en termes de qualité, les minéralisations qui seront mesurées pourront être plus importantes 34% du temps avec des conditions équivalentes aux sources. Cette situation reste toutefois représentative la majeure partie de l'année et, en prenant en compte cette incertitude, les objectifs de l'étude peuvent être atteints.

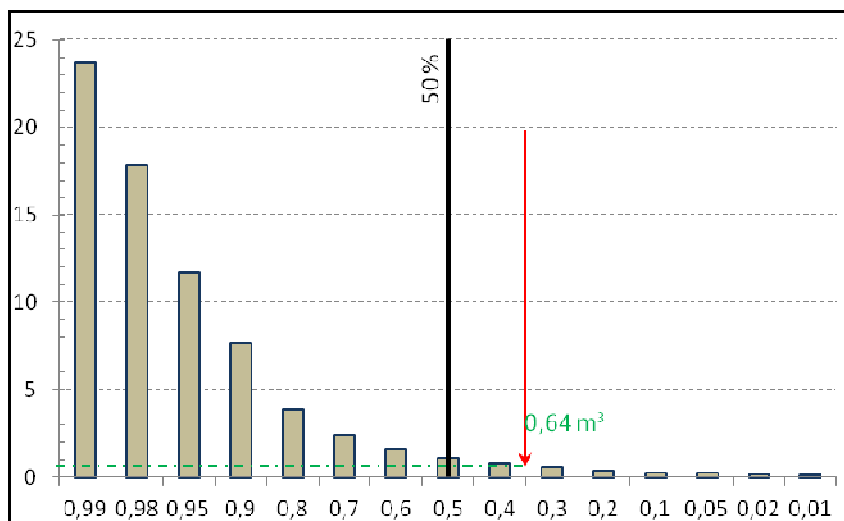


Figure 49 : Débits classés de l'Orain à Deschaux et position du débit estimé lors de la campagne de juillet 2016.

En abscisse, est représentée la fréquence et en ordonnée les débits en $m^3.s^{-1}$

9.1.1.2 CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE EN LIEN AVEC L'EXPLOITATION

Le comportement des sources est très variable d'un exutoire à l'autre, ce qui est probablement lié à leur degré de connexion avec l'exploitation. Si l'on considère l'ensemble des exutoires salés, l'évolution globale du flux de sel décrite au § 8.2.1 affiche un certain décalage avec les événements hydro-climatiques. En effet, on observe un cycle biennuel avec un maximum en concentration et débit qui se manifeste au printemps ou au début de l'été, et un minimum durant l'hiver. Ce cycle est en opposition de phase avec le cycle hydrologique de surface comme présenté Figure 50.

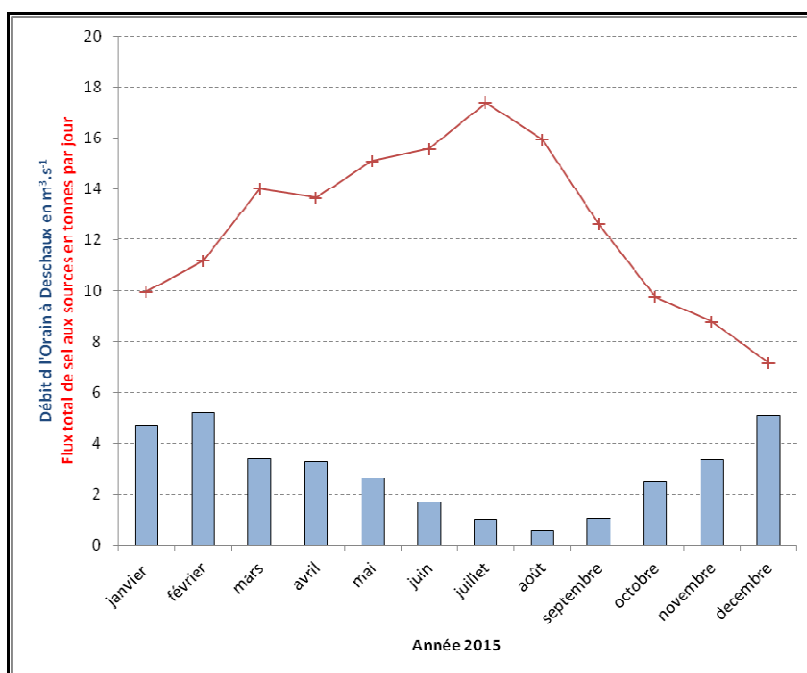


Figure 50 : Evolution pour l'année 2015 du flux de sel total en provenance de l'exploitation comparé aux débits moyens mensuels sur la période 1968-1996 de l'Orain à Deschaux

Le 4 juillet 2016, le flux de sel drainé par l'ensemble des sources atteignait 20 tonnes par jour soit le maximum mesuré depuis 1999, période où le site était en phase d'exploitation et d'extension.

9.1.1.3 SYNTHÈSE SUR LES CONDITIONS DE RÉALISATION DES PRÉLÈVEMENTS.

Du point de vue du sel produit par l'exploitant, nous nous sommes placés dans un cas très défavorable mais qui risque de se reproduire régulièrement dans le futur si l'évolution actuelle des sources se poursuit. Le flux de sel drainé par les sources était voisin de 20 tonnes par jour, soit la valeur la plus élevée depuis 1999 suite à la mise en exploitation des nouvelles pistes.

Du point de vue hydrologique, le printemps ayant été particulièrement pluvieux, bien que le mois de juillet soit habituellement une période où l'on rencontre des débits d'étiage (Figure 50), les conditions des 5, 6 et 7 juillet 2016 n'étaient pas des conditions d'étiage. La fréquence de retour du débit investigué est en effet de 0,34.

Les cycles hydrogéologiques et hydrologiques sont en inversion de phase comme présenté en Figure 50. Par conséquent en termes de salinité des cours d'eau, on a affaire à deux périodes très contrastées :

- l'hiver durant lequel le flux de sel diminue et les débits augmentent, il en résulte une faible minéralisation des cours d'eau ;
- l'été avec une période de flux de sel élevé qui se conjugue aux périodes d'étiages des cours d'eau, ce qui a pour effet de concentrer les eaux dans le réseau hydrologique en provenance de l'exploitation par rapport à la période hivernale. Les investigations ont été réalisées durant cette période.

Un suivi détaillé du bassin versant permettrait d'identifier clairement la situation et l'évolution de chaque cours d'eau. Pour la cartographie réalisée en juillet 2016 ainsi que les prélèvements destinés aux bioessais, il semble donc que la période choisie soit plutôt minorante (Figure 49) en termes d'impact potentiel sur le milieu et de salinisation des eaux de surface et ce bien que le mois de juillet soit habituellement une des périodes les plus impactées (Figure 50).

9.2 CARTOGRAPHIE DE LA SALINITÉ

9.2.1 CALCUL DES CONCENTRATIONS EN NaCl

Au total, 62 mesures de conductivité électrique de l'eau ont été réalisées sur le réseau hydrographique de la partie amont de l'Orain ainsi que, sur 10 de ces points, des prélèvements d'eau. L'analyse de ces échantillons a permis de quantifier précisément leur concentration en NaCl. Il a ainsi été possible d'établir une relation entre la concentration en sel mesurée en laboratoire et la conductivité électrique mesurée *in situ* du type $[NaCl] = f(Cond)$ (Figure 51). Cette relation a ensuite permis d'estimer avec une erreur évaluée à 10% les concentrations en sel des points pour lesquels seule une mesure de conductivité électrique avait été réalisée (Annexe 18). L'incertitude dans l'évaluation des concentrations en sel va dépendre principalement de la proportion des différents faciès d'eau présents au niveau des cours d'eau considérés. Il est également important de noter que plus les minéralisations sont importantes plus la mesure de conductivité électrique est entachée d'incertitude. Il faut donc garder à l'esprit que pour les minéralisations

extrêmes, il s'agit plus d'une approche de l'ordre de grandeur de la salinité que d'une mesure rigoureuse.

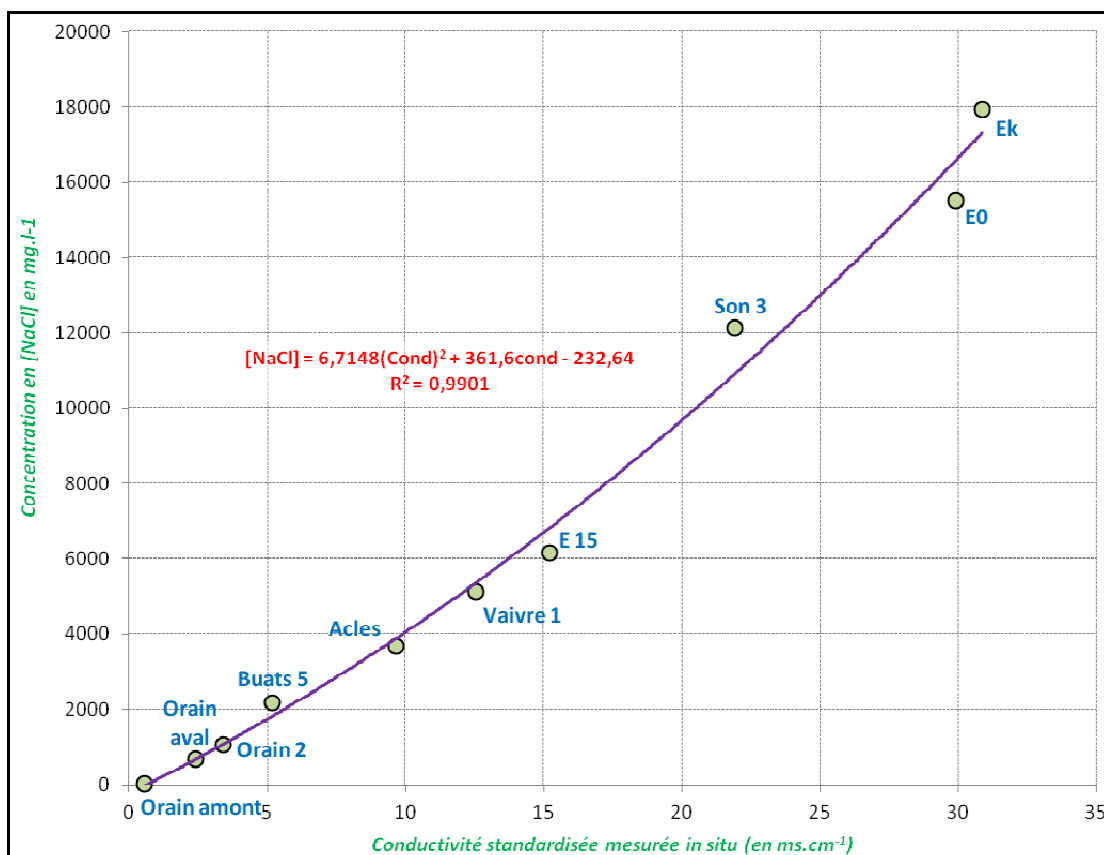


Figure 51 : Relation du type $[NaCl] = f(Cond)$ reliant les concentrations en sel à la conductivité électrique de l'eau mesurée in situ

La relation liant la conductivité électrique de l'eau à la salinité ne s'applique qu'aux cours d'eau où la minéralisation est influencée par un écoulement ayant la signature du faciès anthropisé, l'incertitude devenant très grande lorsque les concentrations en sel sont faibles. Ainsi pour l'Orain avec un apport réduit des sources salées, dans sa partie amont par exemple, la relation $[NaCl] = f(Cond)$ ne s'applique pas : ce point de mesure a été utilisé pour déterminer la conductivité électrique correspondant à une concentration en sel égale à 0.

Lorsque la minéralisation, même élevée, n'est pas le résultat de concentrations fortes en chlorures et sodium mais par exemple en sulfates et calcium, cette relation ne s'applique pas également. C'est le cas des eaux drainées au niveau des sources salées naturelles comme à Saint-Lothain et au niveau du Bief salé au nord du bassin versant.

9.2.2 CARTOGRAPHIE DE LA SALINITÉ

Les 62 mesures de la conductivité électrique de l'eau ont été acquises sur une durée de 3 jours les 5, 6 et 7 juillet 2016 (Annexe 18). Pendant cette période, un incident sur la pompe d'injection de l'eau de dilution est intervenu. Ainsi les volumes d'eau « douce » injectés dans le réseau hydrographique ont été les suivants pour ces trois jours : 56,42 m³ le 05/07, 7,38 m³ le 06/07 et 0 m³ le 07/07. Cette panne est à prendre en compte dans l'interprétation qui va être faite de nos mesures. Elle va nous permettre notamment d'évaluer une partie de l'effet de la

dilution sur certain cours d'eau. Cependant, il sera nécessaire d'être prudent dans les interprétations que nous pourrions faire des mesures avec et sans dilution, étant donné que la coupure d'alimentation en eau douce est intervenue progressivement et que suivant les cours d'eau les effets de la dilution de l'exploitant sont en mesure de persister plusieurs heures après l'arrêt total d'injection.

Les conductivités électriques mesurées, ainsi que les concentrations en NaCl calculées pour chaque point de mesure, ont été représentées sur la carte en Annexe 19. Ces mesures ont été interpolées à l'ensemble du linéaire des cours d'eau en Figure 2. La cartographie réalisée permet de faire les observations suivantes :

- Ruisseau de Vaivres (Annexe 19) :

L'interpolation des valeurs de salinité a permis de créer la carte interprétée présentée en Figure 2. Il apparaît des situations contrastées pour les différents cours d'eau. Le ruisseau de Vaivres avant sa confluence avec le Ruisseau de Saint-Lothain et le ruisseau du Son sont les plus touchés avec des concentrations supérieures à 5 g.L^{-1} et qui atteignent jusqu'à 18 g.L^{-1} pour la source Ek, source la plus concentrée de la forêt de Vaivres. Au total, lors de nos investigations, le groupe de source $E_{H,I,J,K}$ représentait un débit de $40,5 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ et une concentration moyenne de $10,6 \text{ g.L}^{-1}$.

- Ruisseau du Son (Annexe 19) :

Le ruisseau du Son est le cours d'eau qui affiche les concentrations les plus élevées sur les linéaires les plus importants. En effet, au sud de Tourmont juste avant la confluence avec l'Orain la conductivité mesurée atteint encore 16 ms.cm^{-1} . Sur les 700 premiers mètres du cours d'eau (sur une longueur totale de 2,25 km), la conductivité électrique reste supérieure à 21 ms.cm^{-1} . Hors dilution cette zone est probablement plus étendue : les fortes valeurs mesurées à l'amont ont été réalisées hors dilution (07/07/2016) et les valeurs plus faibles à l'aval avec dilution (05/07/2016). La source E_0 qui alimente le Son présentait en juillet 2016 un débit de $22 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ et une concentration de 16 g.L^{-1} de NaCl.

La forte salinité du Son induit une augmentation temporaire de la conductivité électrique de l'Orain au-dessus de 1 g.L^{-1} . Ce n'est qu'après la confluence avec la Glantine que la salinité de l'Orain redescend en dessous de 1 g.L^{-1} .

- Ruisseau des Buats (Annexe 19) :

Le ruisseau des Buats est celui qui affiche les concentrations les moins élevées : 6 g.L^{-1} dans sa partie amont et entre $1,4$ et $2,6 \text{ g.L}^{-1}$ dans sa partie aval. La source E_{15} alimentant le ruisseau des Buats a un débit pour la période étudiée de $3,9 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ et une concentration de 6 g.L^{-1} .

- Ruisseau de l'Etang (Annexe 19) :

Le ruisseau de l'Etang voit sa minéralisation totale augmenter au niveau de sa confluence avec le Ruisseau de Vaivres. Il passe de $3,3 \text{ ms.cm}^{-1}$ à $10,5 \text{ ms.cm}^{-1}$. En termes de concentration en NaCl cela représente une augmentation de $0,4 \text{ mg.L}^{-1}$ à $4,2 \text{ g.L}^{-1}$.

- Bief d'Acles (Annexe 19) :

Il est formé par la confluence du ruisseau de l'Etang et du ruisseau des Buats. La confluence ne montre pas d'effets significatifs sur la minéralisation du bief d'Acles qui conserve une minéralisation proche de celle du ruisseau de l'Etang avec des valeurs de salinité comprises entre 4,5 g.L⁻¹ pour le point le plus aval et 5,6 g.L⁻¹ pour le point le plus amont hors dilution, et autour de 6 g.L⁻¹ avec dilution. Sur ce cours d'eau et pour la période concernant nos investigations, la dilution a un effet quantifiable sur le bief d'Acles.

- L'Orain (Annexe 19) :

Les eaux de surface drainant la zone exploitée n'ont pas d'influence sur la minéralisation de l'Orain. Le premier effet visible au niveau de l'Orain est détecté à sa confluence avec le Son. Cette confluence et celle avec le Bief d'Acles constituent les deux zones d'apport de l'exploitation vers l'Orain *via* le réseau hydrologique local.

Sur la station de l'Orain à Deschaux, le QMNA 5 (Débit mensuel minimal annuel avec une période de retour de 5 ans) est de 0,230 m³.s⁻¹ et le débit mesuré le plus faible sur la période 1968-1996 de 0,145 m³.s⁻¹. Il est donc possible d'estimer qu'au niveau du point le plus aval de restitution des apports salins de l'exploitation de Poligny dans l'Orain (sud de Brainans), le débit le plus faible susceptible d'être rencontré est de 0,072 m³.s⁻¹ et que tous les cinq ans un débit minimum mensuel de 0,115 m³.s⁻¹ est susceptible d'être rencontré. En termes de concentrations à l'aval immédiat dans l'Orain, en considérant un flux de sel de 20 tonnes par jour (et une dilution de 80 m³.h⁻¹) équivalent à celui de janvier 2016, les concentrations en NaCl pourraient atteindre 2,45 g.L⁻¹ et 1,68 g.L⁻¹ respectivement pour le débit le plus faible et pour le QMNA5.

9.3 IMPACT DES SOURCES SALÉES SUR LES ORGANISMES VIVANTS AQUATIQUES

9.3.1 RÉSULTATS DES BIO-ESSAIS

9.3.1.1 TOXICITÉ CHRONIQUE SUR LES INVERTÉBRÉS

Les résultats des essais de toxicité chronique réalisés sur les eaux de minéralisation croissante sont présentés en Figure 52. La minéralisation de la source E_k a été diluée avec une eau standardisée afin de tester différentes minéralisations sur la reproduction des invertébrés. On observe que les premiers effets apparaissent au-dessus de la Concentration Effective²³ 10% (CE 10 %) de 1,3 g.L⁻¹. Il est intéressant de noter que le prélèvement effectué sur l'Orain à

²³ La CE 10% correspond à une variation de 10% d'effet par rapport au témoin. En pratique, il est admis que le seuil de 10% correspond à la variabilité biologique. En dessous de ce seuil, statistiquement parlant, il n'est pas possible de distinguer les effets attribuables à une substance de la variabilité biologique. Par convention, cette valeur peut être utilisée de façon équivalente à la NOEC (No Observable Effect concentration).

La CE 50 % correspond à la concentration pour laquelle il y a 50% d'effet, par exemple 50% de mortalité dans la population ou 50% de pontes en moins.

l'amont de la zone impactée par l'exploitation a, bien qu'il ne contienne pas de sel, un effet non négligeable sur la reproduction des daphnies.

Cet effet est comparable à celui mesuré sur l'Orain après mélange avec les apports salins en provenance de l'exploitation de sel. La situation vis-à-vis de la reproduction des daphnies semble donc dégradée avant même que du sel soit présent dans les cours d'eau et à l'exutoire du système. L'impact de la salinité sur la reproduction des invertébrés à la sortie du bassin versant ne peut donc pas être mis en évidence. La reproduction des invertébrés aux stations prélevées est matérialisée en Figure 52 par la courbe d'effet obtenue à partir de l'eau de la source E_k.

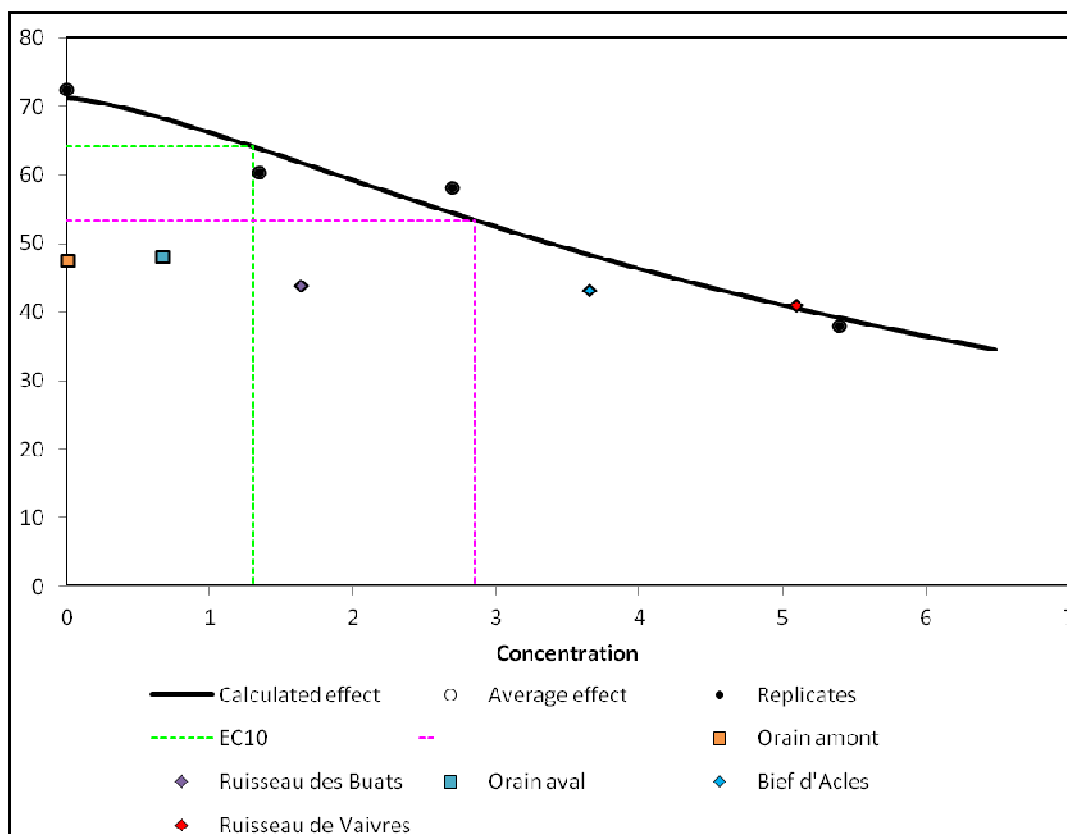


Figure 52 : Résultat de l'essai daphnie 21 jours

En abscisse est représentée la concentration en NaCl (en g.L⁻¹) de l'échantillon testé et en ordonnée le nombre de pontes par mères vivantes. Les points noirs correspondent aux résultats des différentes dilutions testées de la source E_k. La courbe correspond à la modélisation dose/effet calculée à partir de ces points

Il apparaît donc que l'eau de l'Orain est modérément dégradée et affecte la reproduction des Daphnies avant que le cours d'eau ne reçoive les apports salés en provenance de l'exploitation de sel. Ajouté à ceci, comme développé précédemment au § 7.3., que la minéralisation totale de certains cours d'eau hors concentration en sel est déjà très importante notamment pour les eaux à faciès sulfatés. Il est donc très probable que la reproduction des invertébrés soit affectée naturellement par le milieu et ce, même en contexte non dégradé par l'exploitation.

L'analyse statistique des résultats démontre que la situation au ruisseau des Buats, au bief d'Acle et à la station Orain aval est identique à celle à l'amont de la zone impactée par l'exploitation. L'analyse statistique des résultats montre que seule la station du ruisseau de Vaivres présente un impact sur la reproduction des invertébrés qui puisse être relié au flux de sel. Dans ce contexte l'impact du sel présent dans les cours d'eau sur la reproduction des invertébrés, n'est pas détectable, mis à part dans le ruisseau de Vaivres.

9.3.1.2 TOXICITÉ AIGUË SUR LES INVERTÉBRÉS ET LES ALGUES

La courbe dose/effet présentée Figure 53 permet d'identifier le seuil à partir duquel les concentrations en sel commencent à induire une mortalité chez les invertébrés. Ce seuil se localise à la CE 10% ce qui représente une concentration en sel de 6,1 g.L⁻¹, voire 5,3 g.L⁻¹ en prenant en compte les incertitudes de modélisation. Les résultats obtenus pour les algues ont donné des résultats d'allure similaire, à des niveaux légèrement plus élevés. L'utilisation de la valeur seuil déterminée avec les invertébrés est une approche protectrice.

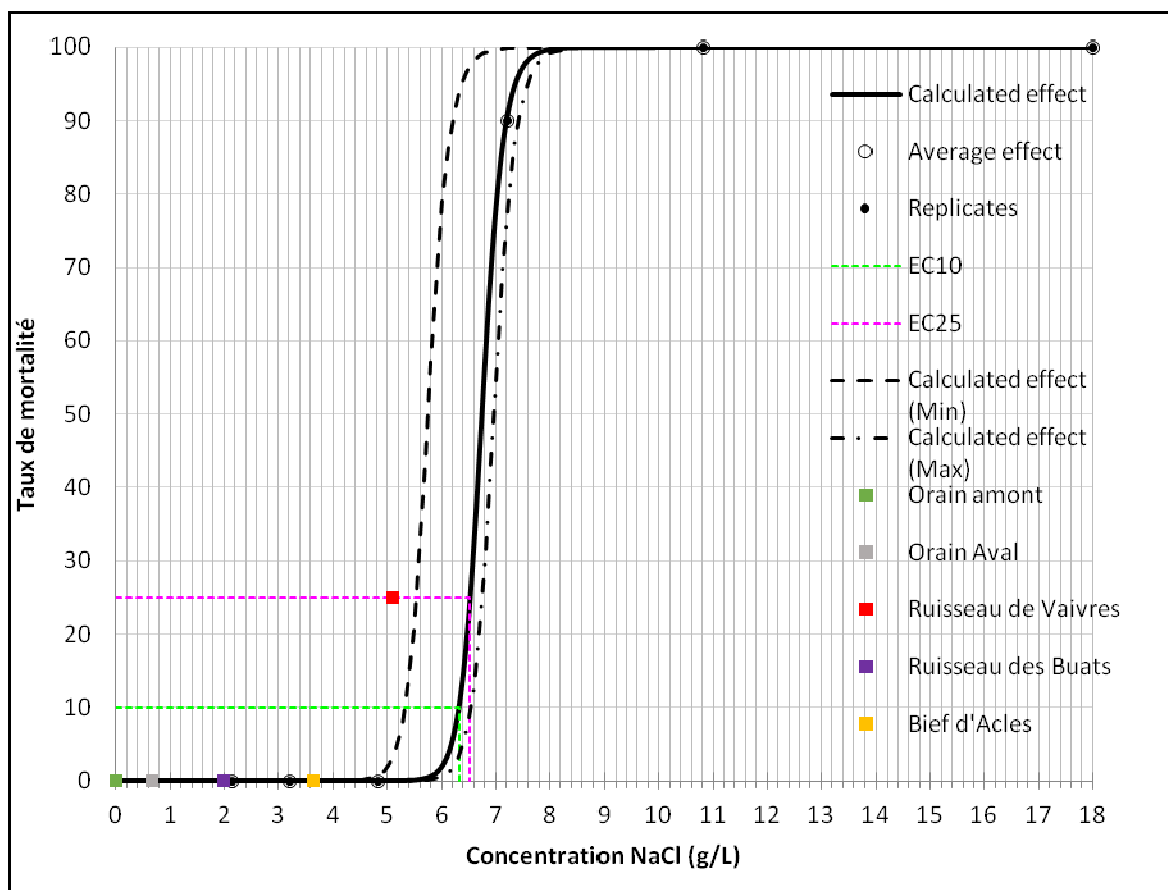


Figure 53 : Courbe dose/effet obtenue à partir de l'eau prélevée sur l'eau de la source Ek.

En abscisse ont été représentées les concentrations en sel et en ordonnée le pourcentage de morts dans la population d'invertébrés (daphnies)

Concernant les vertébrés (poissons), l'essai réalisé à la dilution unique correspondant à 50% de mortalité des invertébrés n'a pas produit d'effets significatifs. Considérer les résultats obtenus sur les invertébrés est encore une approche protectrice.

9.3.2 SITUATION DES COURS D'EAU EN JUILLET 2016

9.3.2.1 SITUATION DE L'ORAIN

Dans les conditions de réalisation des prélèvements, en termes de toxicité, le flux de sel émis par les sources n'a pas d'impact sur l'Orain.

9.3.2.2 SITUATION DANS LE RUISSEAU DE VAIVRES

Dans la partie ouest de la forêt de Vaivres au niveau du ruisseau éponyme, des effets létaux ont été enregistrés pour 25% de la population d'invertébrés. La concentration est telle qu'elle représente un impact éco-toxicologique significatif. Les mesures réalisées hors dilution le 07/07/2016 montrent que lors des arrêts de la dilution, cette situation s'étend au bief d'Acles, jusqu'à proximité de la confluence avec l'Orain.

9.3.2.3 SITUATION DU BIEF D'ACLES

Le bief d'Acles ne présente pas de toxicité aiguë marquée : il n'y a pas d'effet léthal sur invertébrés et seulement un effet limité (3,8%) sur la croissance des algues.

9.3.2.4 LE RUISSEAU DES BUATS

Le ruisseau des Buats reçoit la source d'eau salée E₁₅. Les essais réalisés sur les sources ont révélé que l'eau drainée au niveau de cet exutoire était la moins impactante des trois groupes de sources considérés. Les essais conduits avec l'eau de ce ruisseau n'ont pas montré d'effet sur les populations d'organismes testées.

9.3.2.5 LE RUISSEAU DU SON

Aucun prélèvement n'a été réalisé dans le ruisseau du Son qui reçoit les eaux de la source E₀. Les résultats obtenus avec les eaux de sources E₀ et E_K sont relativement similaires. Etant donné qu'en plus de cette similarité, les mesures de conductivité et de NaCl réalisées lors des études d'hydrogéologues sont plus élevées que celles mesurées sur le ruisseau de Vaivres, il est logique de considérer que de la même manière que pour le ruisseau de Vaivres, le ruisseau du Son voit sa qualité biologique affectée par les rejets de sel.

9.3.3 SYNTHÈSE

Les bio-essais réalisés par l'INERIS ont permis de mettre en évidence seulement sur le ruisseau de Vaivres un effet de la salinité des cours d'eau, induite par l'exploitation. Un effet sur la reproduction des invertébrés apparaît au-delà de 1,3 g.L⁻¹ de sel mais il est difficile d'en attribuer la responsabilité aux sources salées étant donné le constat d'un niveau d'effet similaire dans les cours d'eau naturels dont l'état est par ailleurs déjà modérément dégradé. En adoptant une démarche conservatrice et en tenant compte de l'incertitude des essais, les bioessais ont montré qu'un taux significatif de mortalité des invertébrés apparaît lorsque la concentration en sel dépasse de 5 g.L⁻¹. En juillet 2016, un impact significatif a ainsi été mis en évidence sur les ruisseaux de Vaivres et du Son. Sans l'apport d'eau douce fourni par l'exploitant (dans le but de diluer les concentrations en sel), et dans les conditions de juillet 2016, cet impact significatif se serait propagé aux ruisseaux de l'Etang et au Bief d'Acles (Annexe 20).

10. CONCLUSION

Ce rapport analyse les aléas « mouvements de terrain » résiduels liés à l'ancienne exploitation de sel de la concession de Poligny ainsi que le fonctionnement hydrogéologique du site et son évolution sur le long terme. Il s'appuie sur une documentation relativement détaillée provenant principalement des archives de l'exploitant et sur l'analyse de données *in situ* récentes acquises sur une période de 5 ans après l'arrêt définitif de l'exploitation en février 2011.

A partir des données d'archives et des observations de terrains, une carte informative a été établie sur laquelle figurent, en particulier, la limite de concession, la position de tous les sondages connus d'exploitation, de reconnaissance ou de suivi du site (piézomètres), les anciens effondrements, le périmètre historique des affaissements et les installations de surface encore présentes sur le site.

La méthode d'exploitation mise en œuvre sur le site de Poligny a été celle presque exclusivement des pistes et sondages. Il s'agit d'une méthode de dissolution du gisement de sel par de l'eau douce injectée dans des sondages forés jusqu'à la base de la formation exploitée. L'objectif est d'optimiser la récupération du gisement en dissolvant toute l'épaisseur du gisement selon une bande orientée dans l'axe des sondages alignés (pistes). Il en résulte la création de grandes cavités qui en s'élargissant deviennent instables et s'effondrent, occasionnant en surface des effondrements. Cette méthode mise en œuvre à Poligny, dite intensive, à partir de la fin des années 1920 et jusqu'en 2011 a permis de produire plus de 32 Mt de sel. Auparavant (1890-1932), une petite exploitation par dissolution au toit du sel avait produit de l'ordre de 0,15 Mt grâce à deux sondages.

Une analyse détaillée en retours d'expérience des mouvements de terrain survenus sur le site - intégrant les données d'exploitation, les observations et investigations récentes, ainsi que le contexte hydrogéologique - a permis de caractériser les mécanismes et critères influençant leur survenue. Sur cette base, les aléas mouvements de terrain ont pu être évalués et cartographiés. On retiendra que :

- un aléa effondrement de niveau fort et moyen a été cartographié sur les tronçons de piste non effondrés avec présence de cavités (suspectées ou avérées) de grandes dimensions. A l'exception de deux sondages de la piste 1 (13 et 14), tous les sondages et tronçons de piste concernés sont situés à l'intérieur des limites du site. Pour ces deux sondages, des investigations complémentaires sont envisagées pour préciser l'aléa ;
- un aléa affaissement faible lié à la présence de cavités résiduelles à l'aval de la piste 1 et des deux sondages d'exploitation au toit du sel. Ces aléas sont situés hors des limites du site ;
- un aléa affaissement faible lié à la dissolution au toit du sel. La zone concernée a été définie sur la base des affaissements historiques de la dernière période active de l'exploitation, mesurés par nivellement.

L'exploitation de Poligny a engendré des modifications du contexte hydrogéologique initial dans l'environnement du site. Des sources salées sont notamment apparues dans la forêt de Vaivre. L'analyse des contextes

hydrogéologiques, géologiques, d'exploitation et des résultats du suivi des eaux superficielles (sources, réseau hydrographique) et souterraines (piézomètres) a permis de dresser un constat précis de la situation actuelle et des impacts de l'exploitation sur les eaux et d'envisager des scénarios d'évolution. Pour ce qui concerne les impacts, une étude spécifique des effets de la salinité sur les organismes vivants a été conduite. Elle permet de préciser qualitativement et quantitativement les impacts sur le milieu des sources salées. On retiendra que :

- la minéralisation déjà naturellement élevée des ruisseaux du bassin versant amont de l'Orain est augmentée (jusqu'à sept fois supérieure pour les cours d'eau les plus touchés) par les apports de sel en provenance des sources formées en marge de l'exploitation de sel par dissolution ;
- les ruisseaux affichant les concentrations les plus élevées sont le ruisseau de Vaivres et le ruisseau du Son ;
- en termes de toxicité aigüe, les essais réalisés par l'INERIS montrent que des effets significatifs apparaissent sur les invertébrés et les algues lorsque la concentration en NaCl dépasse 5 g.L^{-1} ; en juillet 2016, c'était le cas du ruisseau de Vaivres et du ruisseau du Son ;
- en juillet 2016, au moment de la réalisation de notre diagnostic, la dilution apportée par l'exploitant permettait de limiter ces effets au seul ruisseau de Vaivres. Sans cette dilution, le ruisseau de l'Etang et le bief d'Acles auraient été touchés ;
- pour la concentration ayant montré des effets significatifs sur les invertébrés, aucun effet n'a été mis en évidence sur les vertébrés.

11. BIBLIOGRAPHIE

- SOLVAY (1943). *Affaissement de la zone des sondages alimentaires 44 et 45.*
- SOLVAY (1949). *Etat de la piste 1.*
- SOLVAY (1951). *Coupe de la piste moyenne (n°1).*
- SOLVAY (1955). *Piste 1 - résultat de l'exploitation des sondages de la piste moyenne.*
- BRGM (1966). *Venues d'eau naturelles dans le gisement salifère.*
- SOLVAY (1966). *Note PCT affaissements.*
- SOLVAY (1966). *Visite de MR Denis à Tavaux – avril.*
- SOLVAY (1966). *Visite de MR Denis à Tavaux – septembre.*
- SOLVAY (1969). *Premiers effondrements piste 100.*
- SOLVAY (1971). *Apparition de tassements de terrain à proximité du village de Miéry - note d'explications et de recommandations.*
- SOLVAY (1972). *Affaissements et dégradation - anciens sondages de Terville.*
- SOLVAY (1972). *Ensemble de documents relatifs aux sondages de reconnaissance.*
- SOLVAY (1974). *Dates effondrements piste 1, 100 et 200.*
- SOLVAY (1976). *Affaissements de Miéry.*
- SOLVAY (1977). *Hypothèse du mécanisme de pollution de la source E15.*
- SOLVAY (1981). *DCT sur pollution source E15 et instabilité anciennes pistes.*
- SOLVAY (1981). *Essai de comparaison entre déformations du sol et évacuation du sel sur la bordure du Jura.*
- SOLVAY (1982-1984). *Affaissement Miéry et puits 100, piste 500.*
- SOLVAY (1982). *DCT sur la pollution de source E15.*
- SOLVAY (1983). *Hypothèse du mécanisme de pollution de la source E15 + autres documents hydro.*
- SOLVAY (1983). *Schéma de fonctionnement affaissements Miéry et pistes.*
- SOLVAY (1984). *Graphiques des chlorures, effondrements, cratères, E15.*
- Ecole des Mines de Paris (1986). *Etude de l'écoulement des eaux douces et salées se produisant dans le champ d'exploitation de Poligny - centre d'informatique géologique.*
- BRGM (1987). *Etude des mouvements de terrains. Rapport de synthèse 1979-1986.*
- BRGM (1990). *Coupe géologique du sondage Solvay Miéry 1.*
- SOLVAY (1990). *Déclaration de travaux d'exploitation - construction de pistes supplémentaires.*

- SOLVAY (1991). *Contribution à l'étude géologique du faisceau ledonien et des formations plio-pleistocènes de la Bresse jurassienne – thèse Université de Franche-Comté.*
- Ecole des Mines de Paris (1991). *Etude de l'impact sur l'environnement de la mise en exploitation de nouvelles pistes d'extraction de saumure .*
- SOLVAY (1991). *Etude géologique du gisement de sel de Poligny - rapport de stage.*
- SOLVAY (1994). *Maîtrise des résurgences salées .*
- SOLVAY (1995). *Essai de pompage AM7.*
- SOLVAY (1995). *Historique de l'exploitation de sel gemme à Poligny - Solvay & Cie.*
- Ecole des Mines de Paris (1998). *Etude de la qualité des eaux au voisinage de l'exploitation de sel de Poligny.*
- Ecole des Mines de Paris (2001). *Réflexion sur l'évolution de l'exploitation de sel à Poligny.*
- Ghoreychi, M. (2001). *Exploitation de sel par dissolution par la société Solvay à Sarralbe. Ecole Polytechnique. DADT des concessions de Sarralbe.*
- Caille (2003). *Dossier d'autorisation de prélèvement dans la rivière l'Orain et dans la nappe de Tourmont, ainsi que des sources salées et de leur dilution.*
- Feuga B. (2005). *Subsidence at Miéry (Jura, France). A case of Subsidence due to the Advance of the Dissolution of the Salt in the Up-Dip Direction.* SMRI, Fall 2005 Technical Class. Surface Subsidence and Sinkholes, Nancy, France.
- SOLVAY (2008). *Evolution qualité des résurgences - rapport de stage.*
- Feuga, B. (2009). *Les effondrements dus à l'exploitation du sel.* Géosciences n°9.
- Bichet et Campy (2009). *Montagne et Paysages du Jura.* NEO Editions.
- SOLVAY (2011). *Etat des sondages abandonnés, pistes 500, 1500, 2500, 3000 et 3500.*

12. LISTE DES ANNEXES

Repère	Désignation	Nombre de pages
Annexe 1	Actes constitutifs de la concession de Poligny	3 A4
Annexe 2	Fiches « Pistes »	13 A4
Annexe 3	Installations de surface	1 A4 + 1 A0
Annexe 4	Caractéristiques des effondrements	6 A4
Annexe 5	Cartographies des affaissements	12 A4
Annexe 6	Profil des sondages de la piste 1	1 A4 + 1A3
Annexe 7	Carte informative	1 A4 + 1 A1
Annexe 8	Carte de l'aléa effondrement de terrain	1 A4 + 1 A1
Annexe 9	Carte de l'aléa affaissement de terrain	1 A4 + 1 A1
Annexe 10	Carte de l'aléa glissement de terrain lié aux cratères d'effondrement	1 A4 + 1 A1
Annexe 11	Exploration de la conductivité électrique des piézomètres récents et anciens implantés sur le site d'exploitation de Poligny	3 A4
Annexe 12	Evolution des concentrations en chlorures et du débit de la source EH	2 A4
Annexe 13	Evolution des concentrations en chlorures et du débit de la source EI	2 A4
Annexe 14	Evolution des concentrations en chlorures et du débit de la source EJ	2 A4
Annexe 15	Evolution des concentrations en chlorures et du débit de la source EK	2 A4
Annexe 16	Evolution des concentrations en chlorures et du débit de la source E0	2 A4
Annexe 17	Evolution des concentrations en chlorures et du débit de la source E15	2 A4
Annexe 18	Concentration en NaCl calculée sur l'ensemble des points de mesure à partir de la relation présentée en Figure 51	2 A4
Annexe 19	Localisation cartographique des mesures de minéralisation effectuées et de la concentration en NaCl calculée pour chaque point	1 A4 + 1 A3
Annexe 20	Cartographies (juillet 2016) des zones du réseau hydrographique impactées par les concentrations en sel avec et sans apports d'eau de dilution de l'exploitant ($[NaCl] < \text{ou} > 5 \text{ g.L}^{-1}$)	1 A4 + 2 A3

**ANNEXE 1 : ACTES CONSTITUTIFS
DE LA CONCESSION DE POLIGNY**

Republique Française

Décret

Société de Recherches
de SEL GEMME
de POLIGNY

Projet de Concession
N° 15

Date: 15 février 1894

Le Président de la République Française,
Sur le rapport du Ministre des Travaux Publics,
Vu la demande présentée, le 19 Décembre 1892, par
M. Louis Baurry, agissant au nom de la société civile de
recherches de sel, constituée le 27 Septembre 1892, par acte
déposé, le 17 Décembre suivant, chez M. Bellier, notaire
à Besançon, en vue d'obtenir une concession de mines de
sel gemme sur le territoire des communes de Poligny,
Cuisant, Noiry, anciennement de Poligny et de St.
Léger, anciennement de Lons-le-Saunier, département
du Jura;

Un plan, en quadruple expédition, copie d'acte de
société et autres pièces, produits à l'appui de ladite
demande;

L'avis au public du 9 février 1893;

Les numéros du Journal officiel des 19 février
et 19 mars 1893, et des journaux "L'Éclair de Besançon"
des 19 février et 16 mars 1893; "L'Union républicaine"
du Jura" des 19 février et 15 mars 1893; "L'Éclair
de Franche-Comté" des 14 février et 14 mars 1893,
dans lesquels ledit avis a été inséré, ensemble les certificats

d'affiches et de publications;
Les rapports des Ingénieurs des Mines, des 1 et 9
août 1893; ensemble les projets d'acte de concession et
autres pièces, y annexés;
L'avis du Préfet du Jura, en date du 16 août 1893;
L'avis du Directeur des Contributions indirectes, du
23 Novembre 1893;
L'avis du Ministre des Finances, en date du 27
Novembre 1893;
L'avis du Conseil Général des Mines, du 15 Décembre
1893;
Vu la loi du 21 avril 1810, modifiée par la loi
du 27 juillet 1880;
Vu le décret du 28 Novembre 1810;
Le décret du 3 Janvier 1813;
La loi du 27 avril 1838 et l'ordonnance du 23
mars 1841;
La loi du 27 Juin 1840 et l'ordonnance du 7
mars 1841, ainsi que l'ordonnance du 26 Juin 1841;
L'ordonnance du 18 avril 1842;
L'ordonnance du 26 mars 1843, modifiée par le
décret du 25 Septembre 1882;
Le décret du 23 Octobre 1892;
Le Conseil d'Etat entendu;

Décrète:

Article premier - Il est fait concession à M.
Louis Baurry, pour le compte de la société civile

constatant qu'il n'existe point d'inscriptions hypothécaires sur la concession ou, dans le cas contraire, un état de celles qui pourraient avoir été prises, en y joignant le plan levé de ces inscriptions, au moins pour la portion du gîte et la quelle il entend renoncer.

Lorsque ces pièces auront été fournies, la pétition sera publiée et affichée pendant deux mois dans les lieux et suivant les formes déterminées par les articles 23 et 24 de la loi du 21 avril 1810, modifiée par la loi du 27 juillet 1850, pour les demandes en concession de mines.

Les oppositions, s'il s'en présente, seront reçues et notifiées dans les formes déterminées par l'article 26 de la même loi.

La renonciation ne sera valable que lorsqu'elle aura été acceptée, s'il y a lieu, par un décret délibéré en Conseil d'Etat.

Article 7. - Le présent décret sera publié et affiché, aux frais du concessionnaire, dans les communes sur lesquelles s'étend la concession.

Article 8. - Le Ministre des Travaux publics et le Ministre des Finances sont chargés, chacun en ce qui le concerne, de l'exécution du présent décret, qui sera inséré par extrait au Bulletin des Lois.

Fait à Paris, le quinze Février, mil huit cent

quatre-vingt-quatorze.

Signé: Carnot,

Par le Président de la République,
Le Ministre des Travaux Publics,

Signé: Jomart,

Pour ampliation:

Le Conseiller d'Etat, Directeur des Routes,
de la Navigation et des Mines,

Signé: Guillaum.

Pour copie conforme:

Le Conseiller de Préfecture,

Signé: Bourge.

Pour copie conforme:

Le Sous-Préfet de Solignoy,

H. Germond

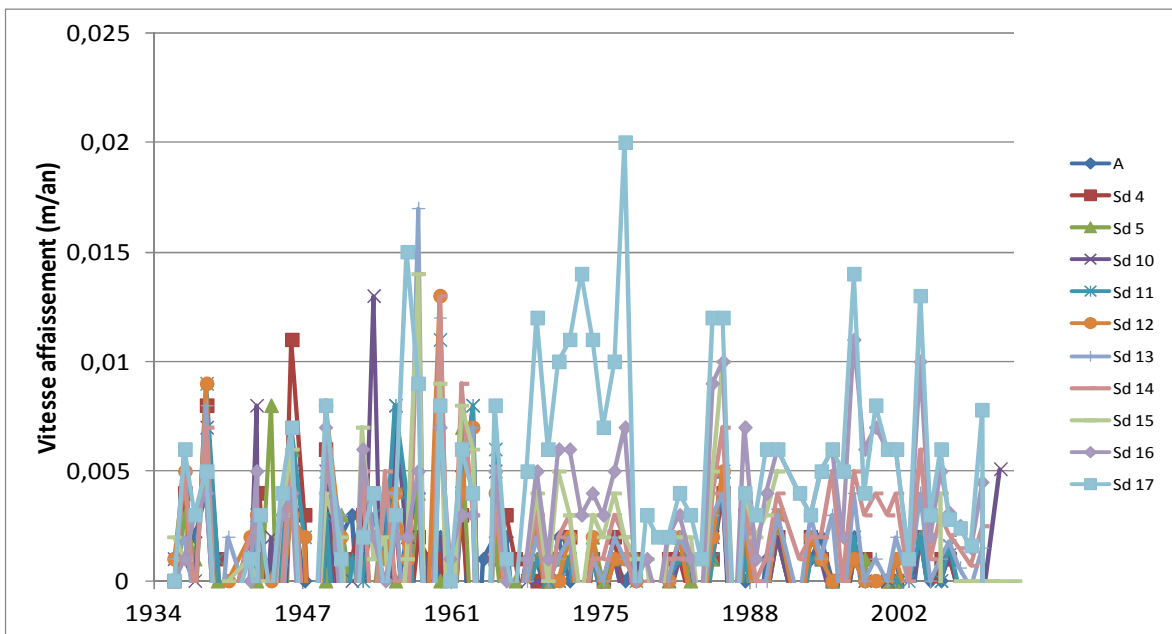
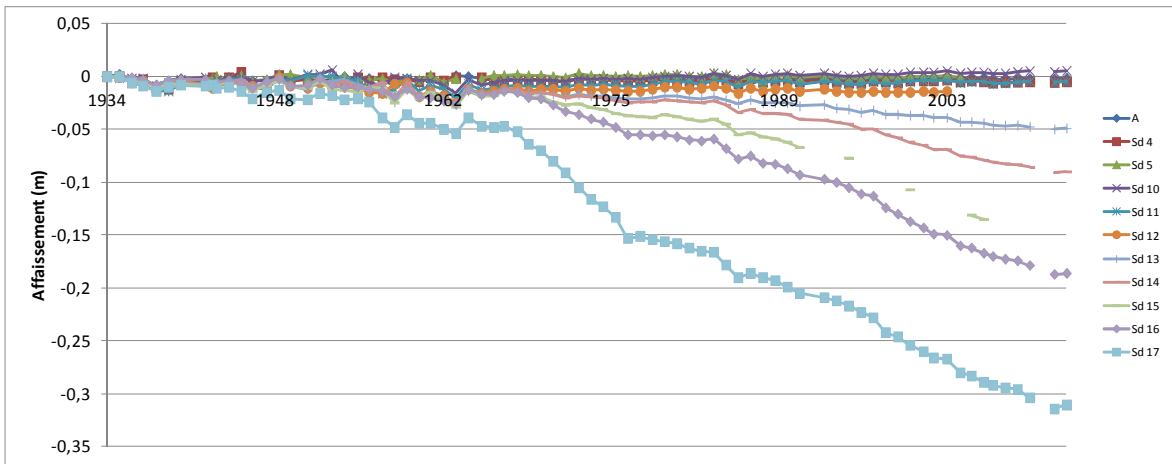
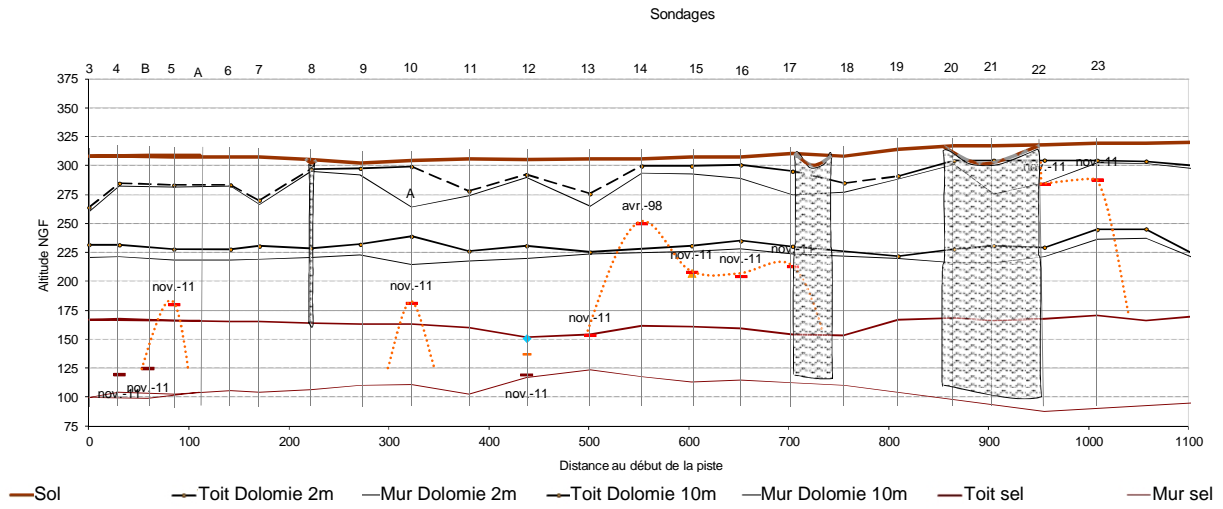


ANNEXE 2 : FICHES « PISTE »

- Coupes longitudinales des pistes
- Affaissements des têtes de sondage
- Vitesses d'affaissement des têtes de sondage

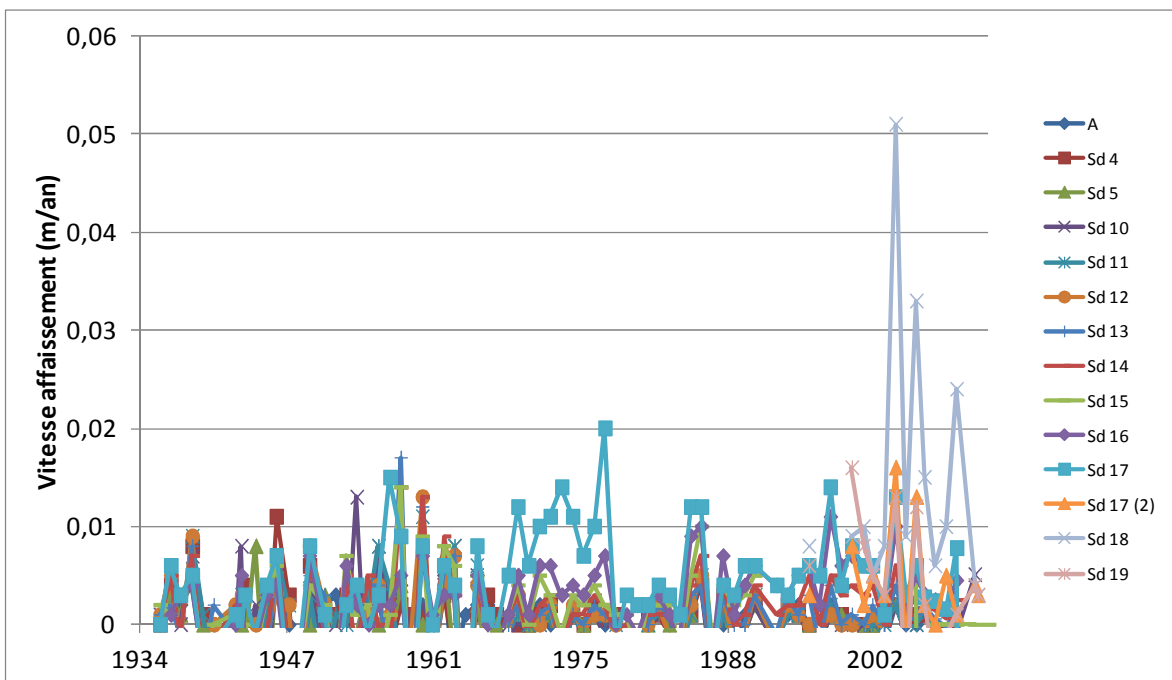
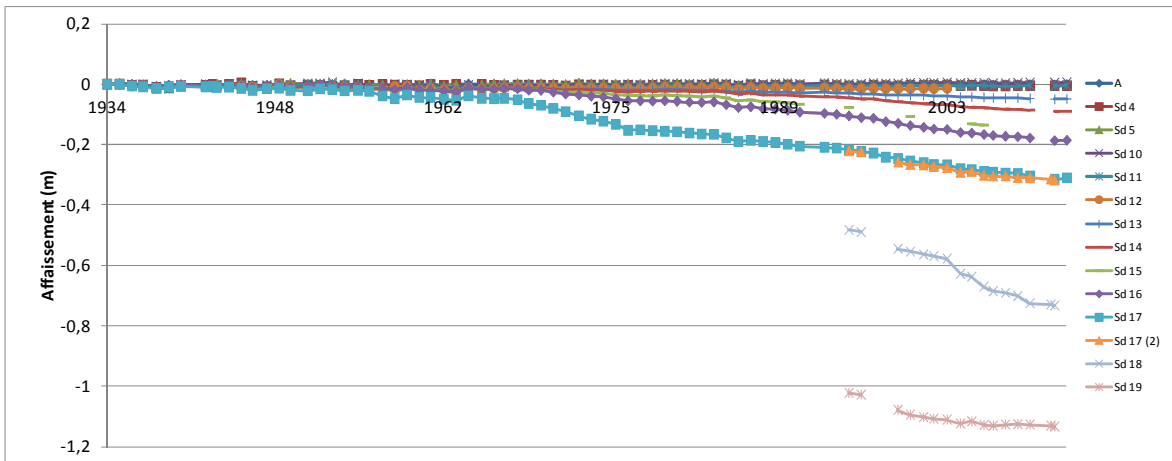
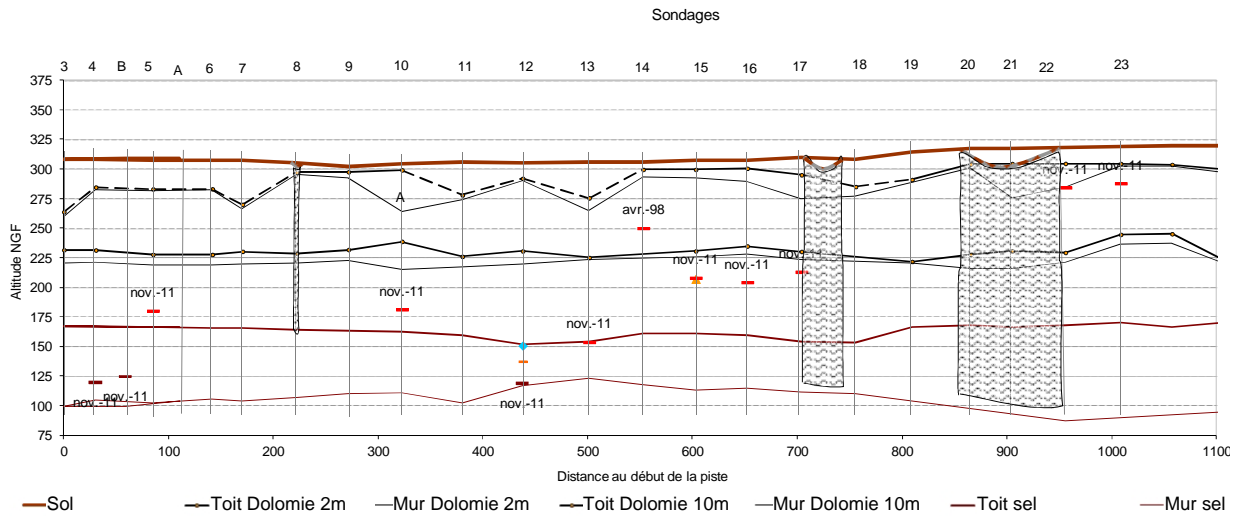
Piste 1 (hors Sd 18 et 19)

Coupe de la portion aval de la piste 1

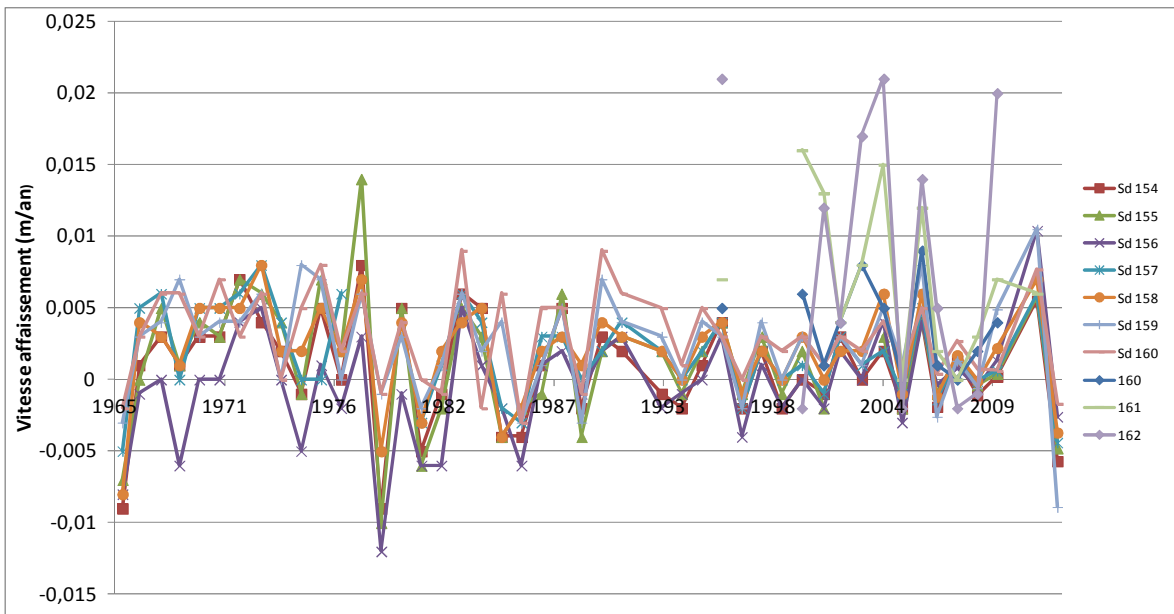
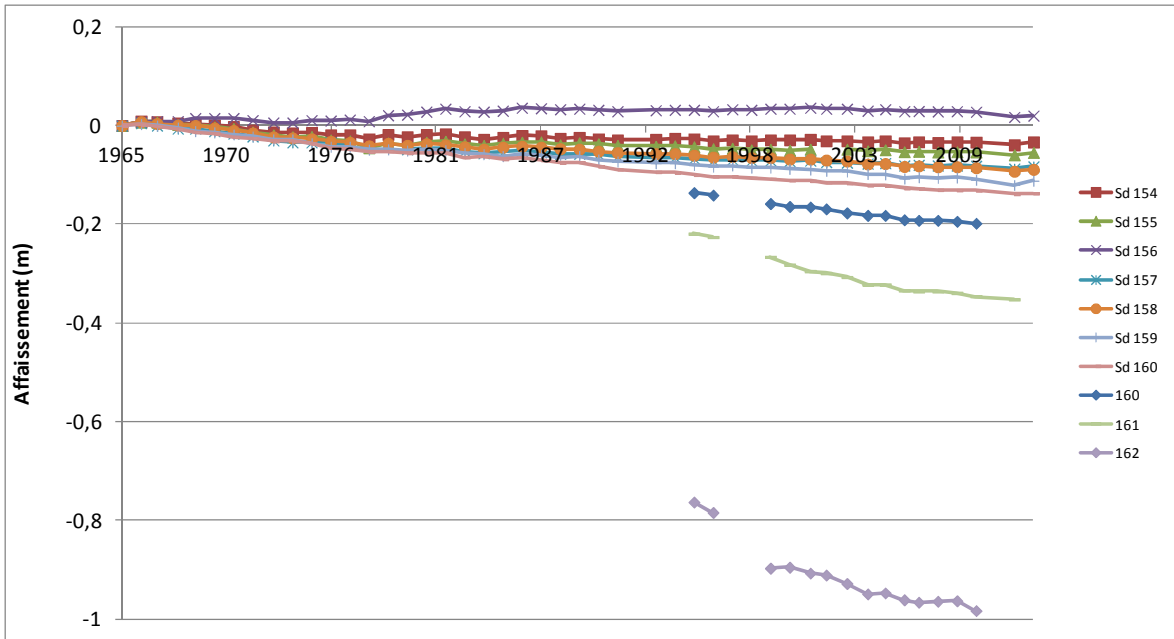
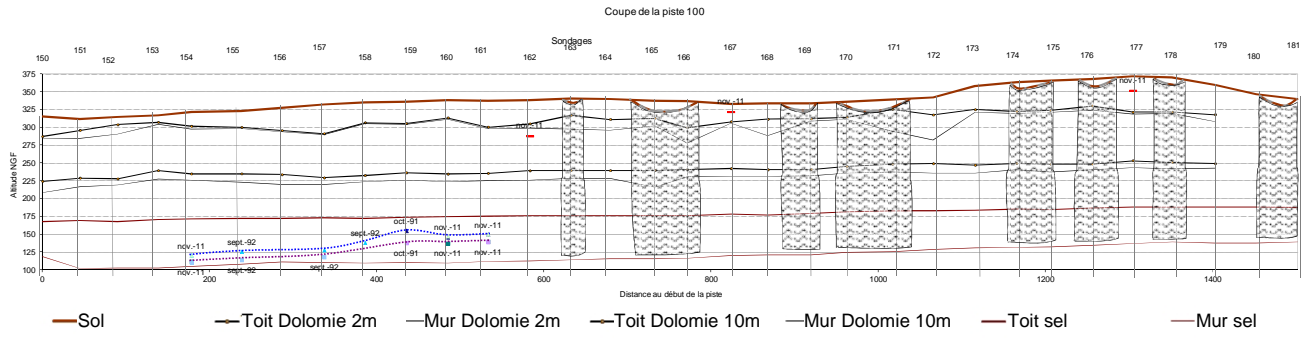


Piste 1 (avec Sd 18 et 19)

Coupe de la portion aval de la piste 1

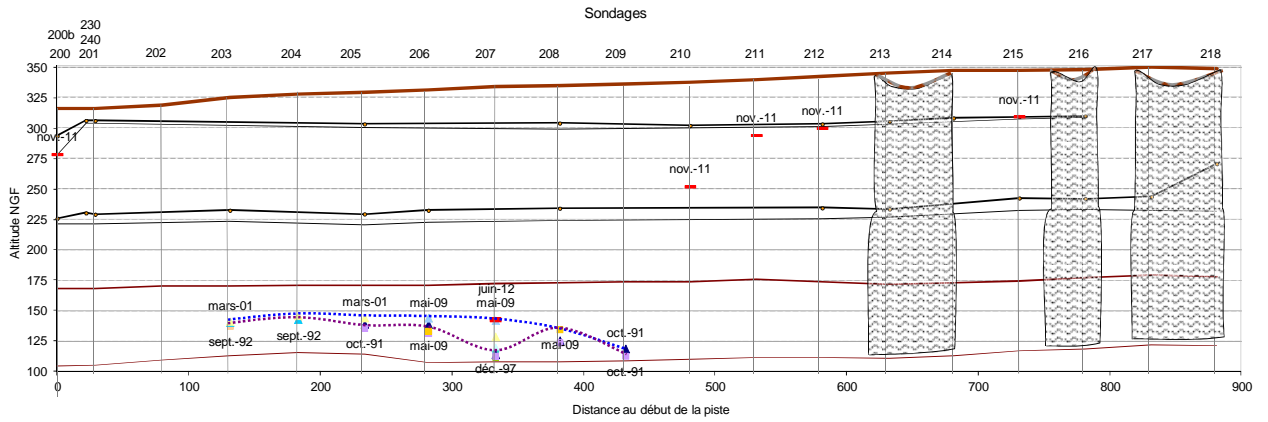


Piste 100

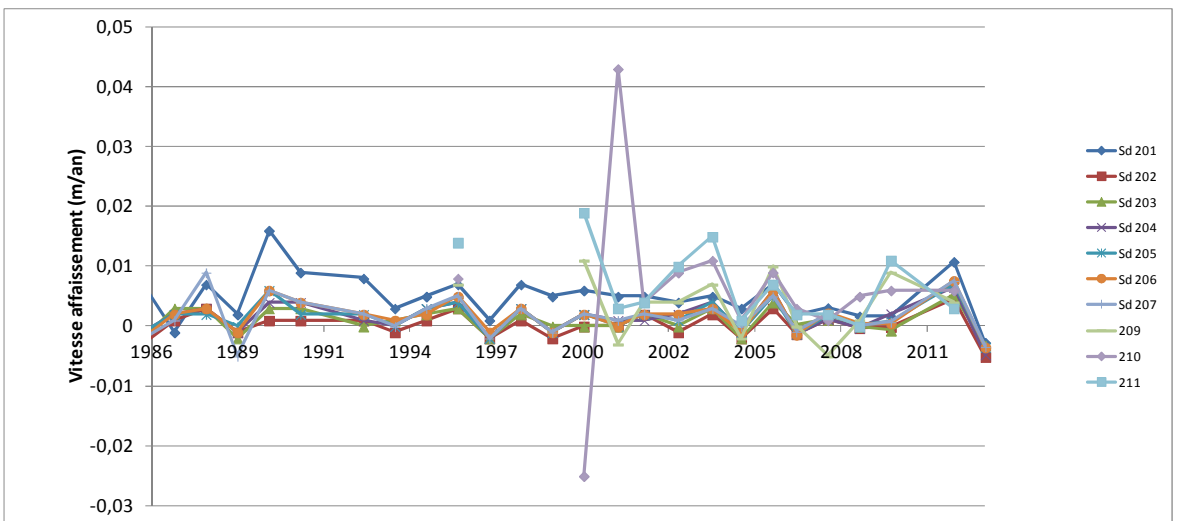
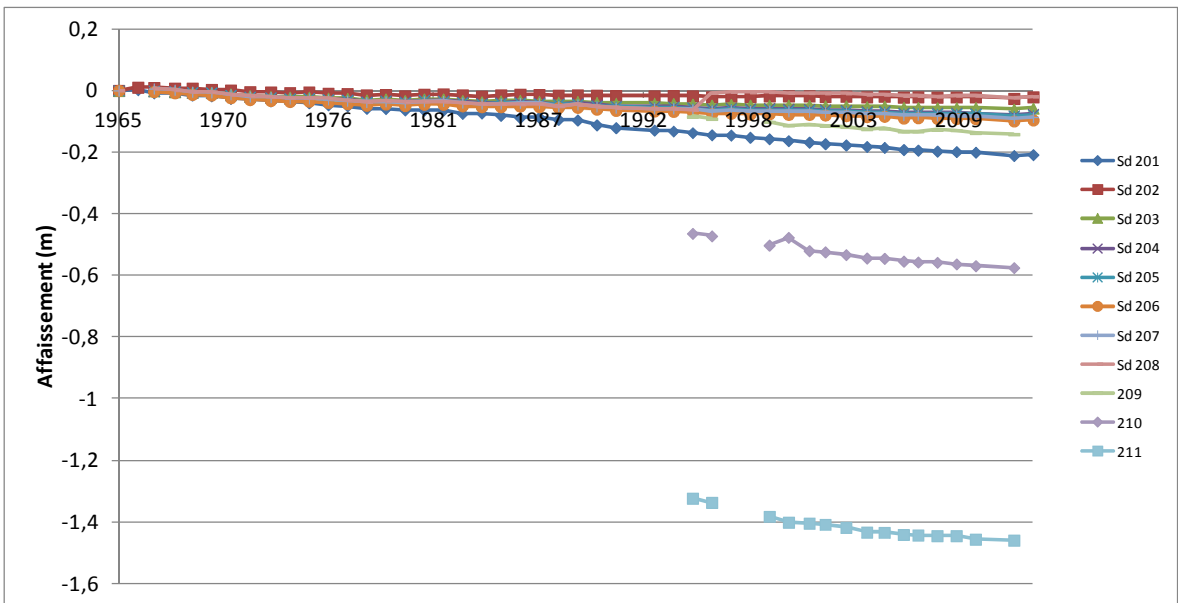


Piste 200

Coupe de la piste 200

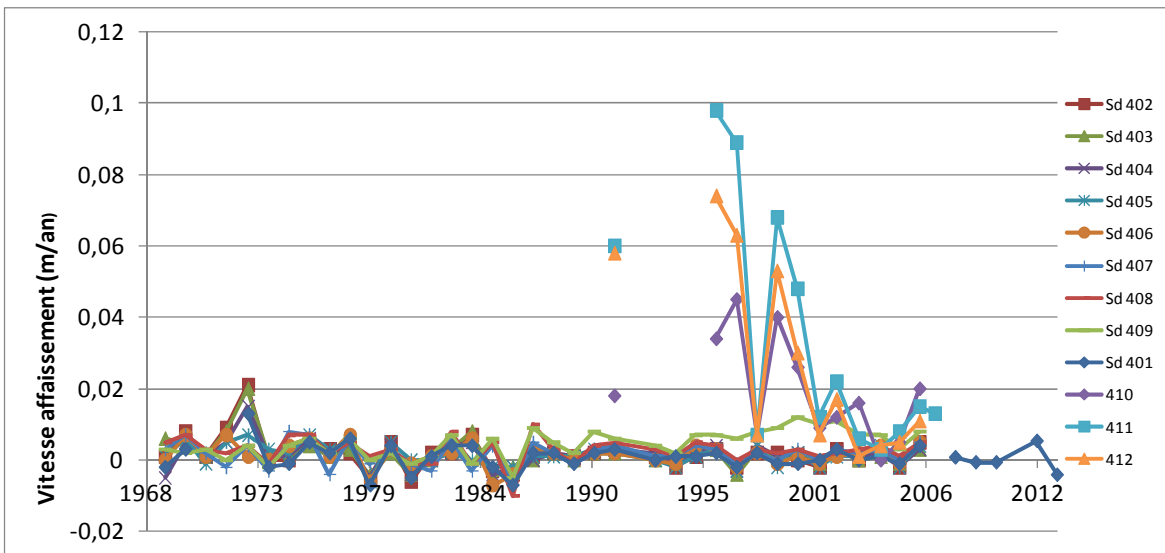
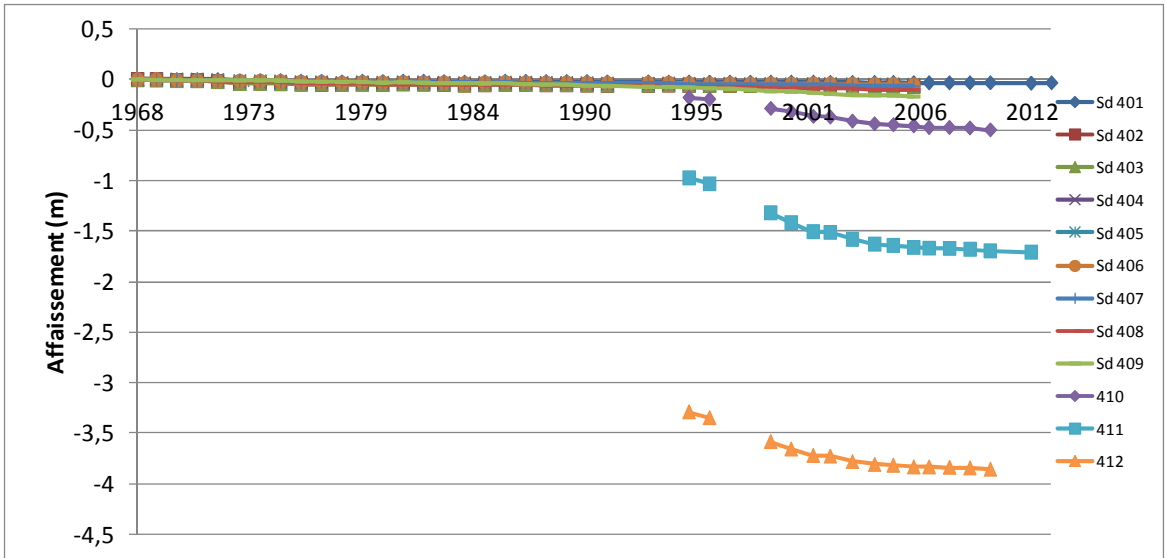
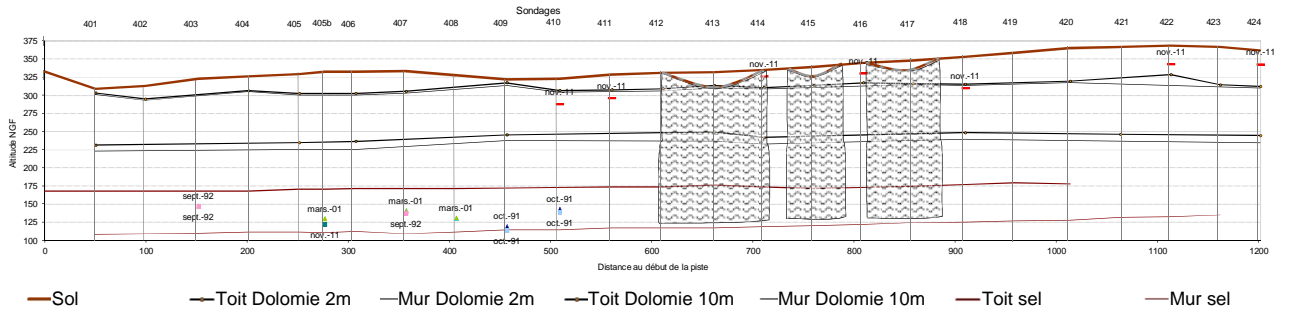


— Sol — Toit Dolomie 2m — Mur Dolomie 2m — Toit Dolomie 10m — Mur Dolomie 10m — Toit sel — Mur sel

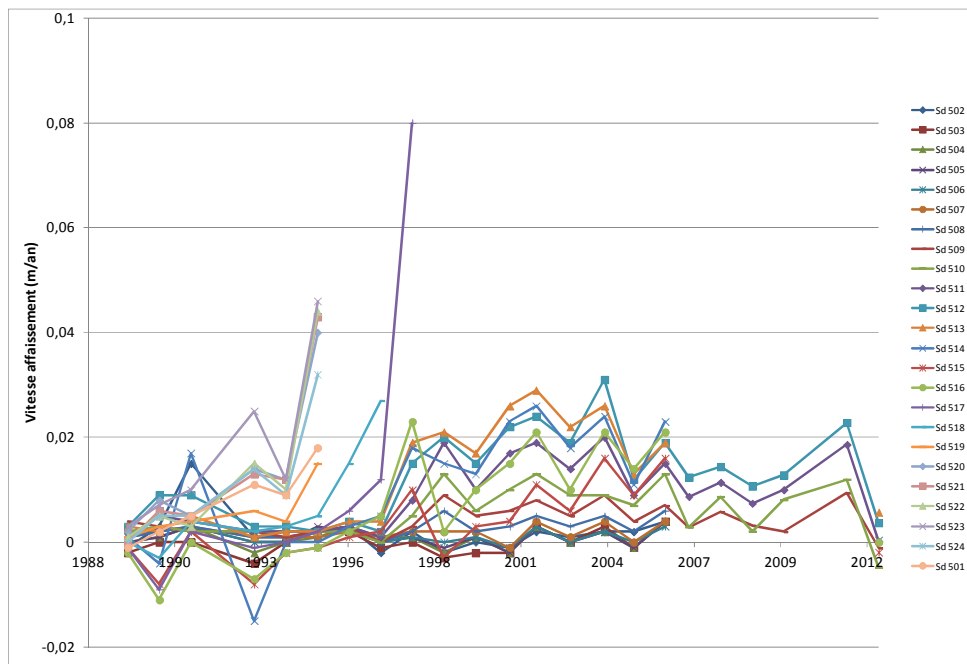
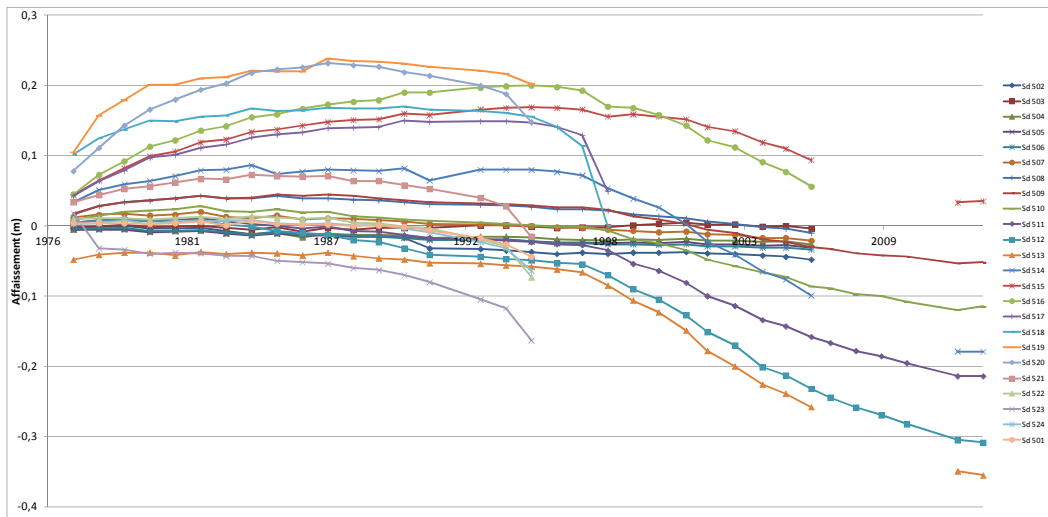
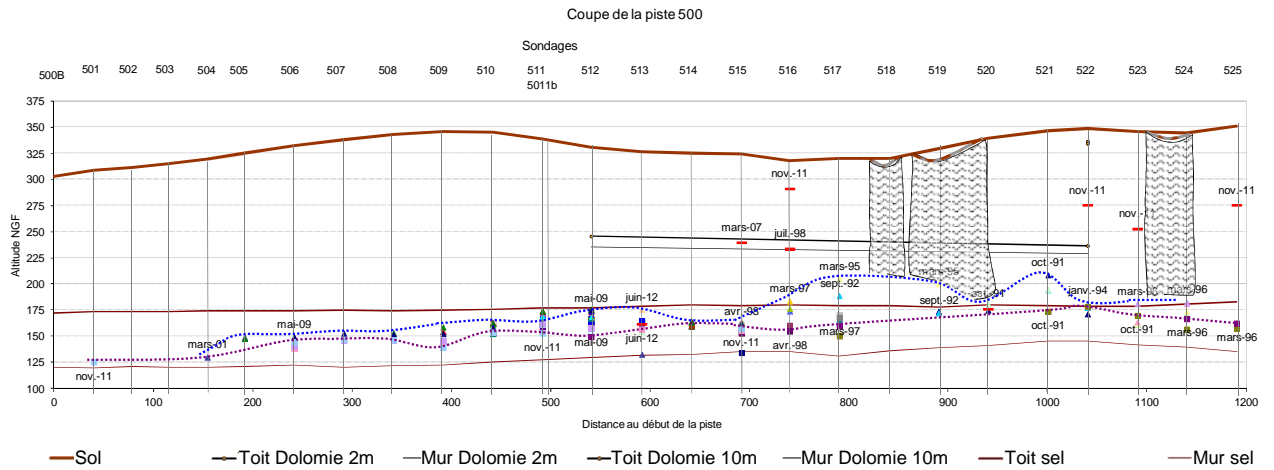


Piste 400

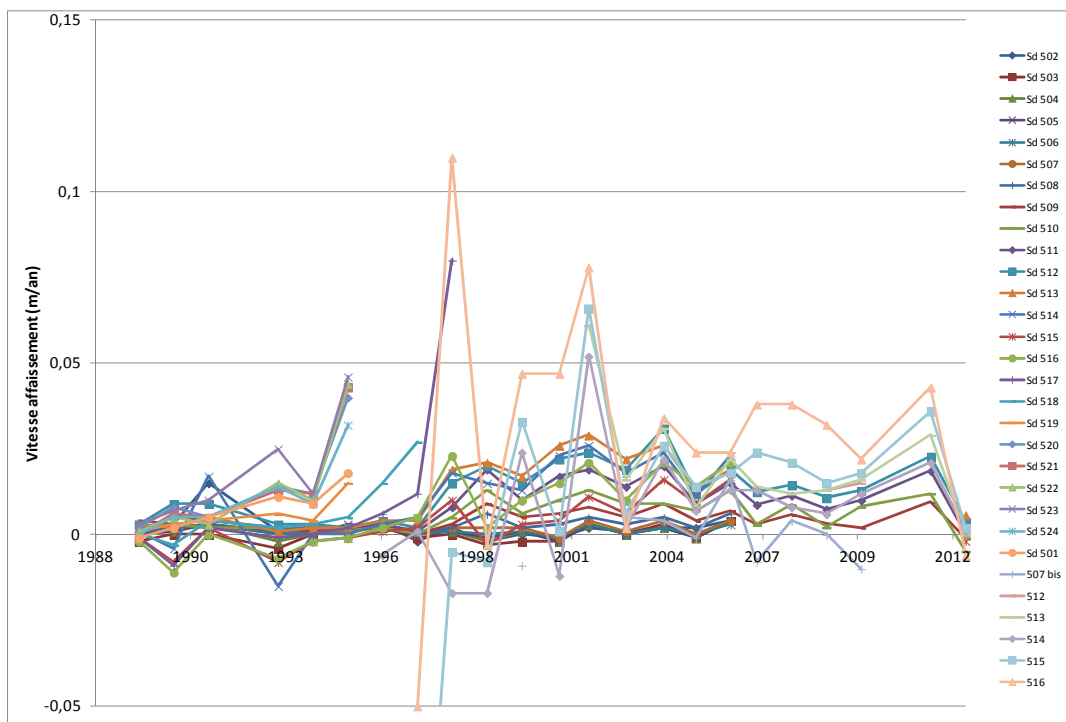
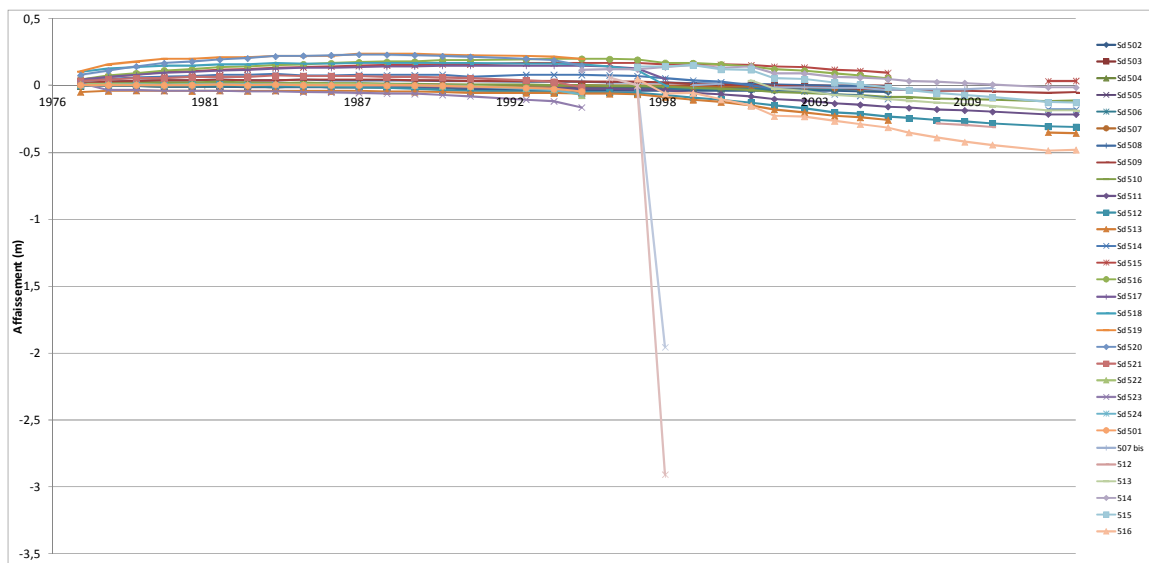
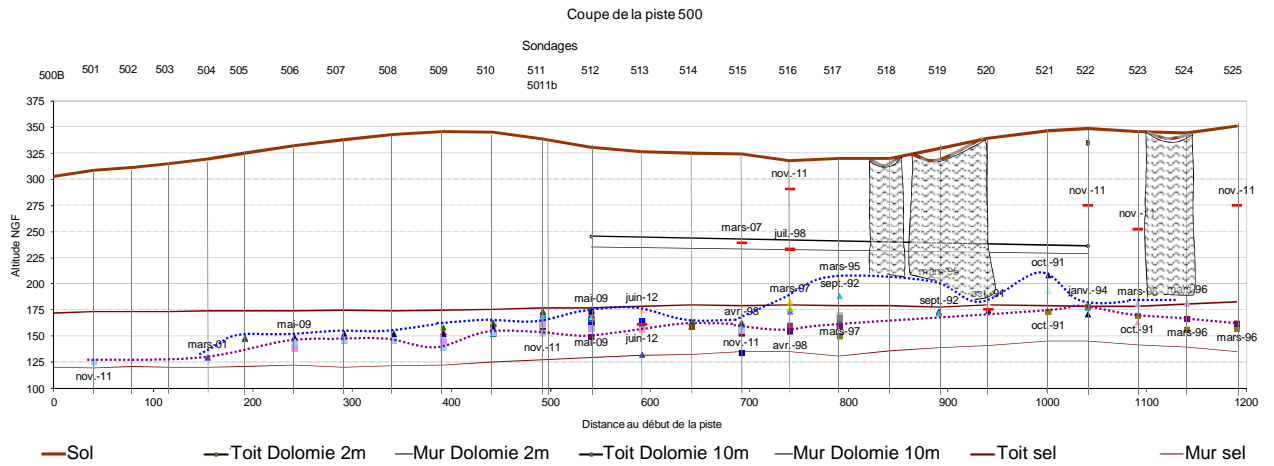
Coupe de la piste 400



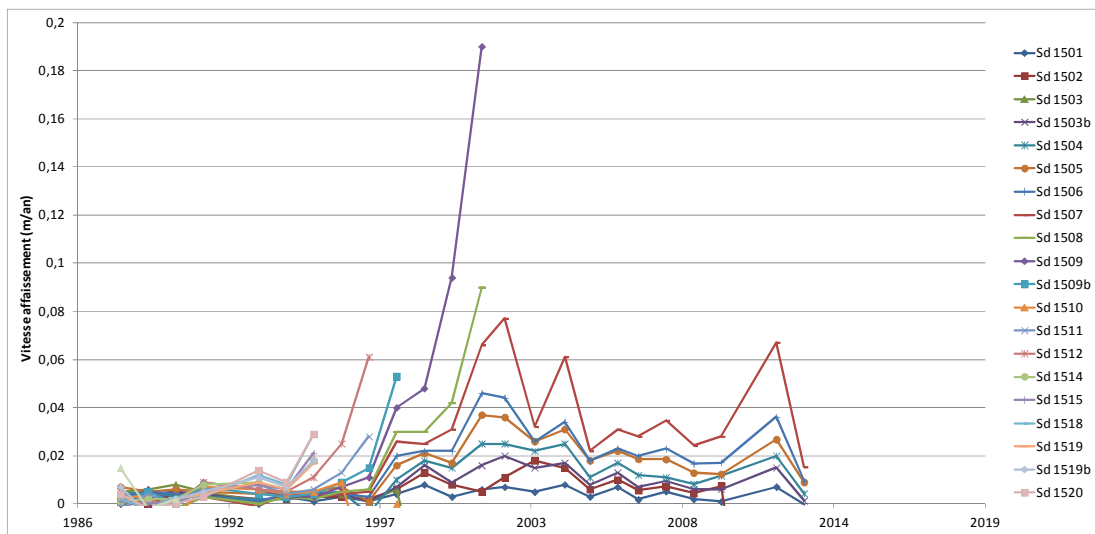
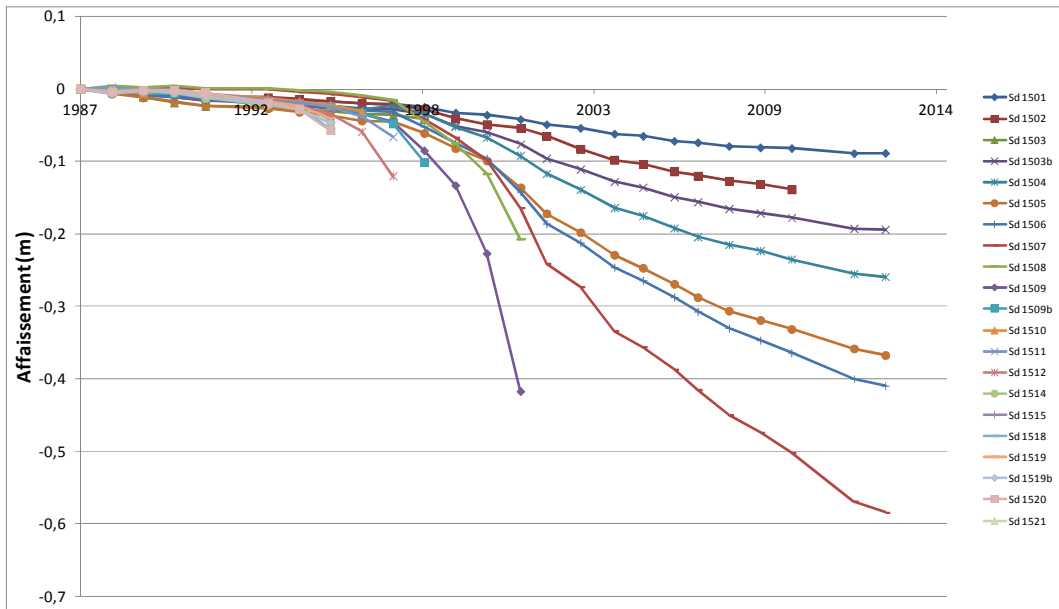
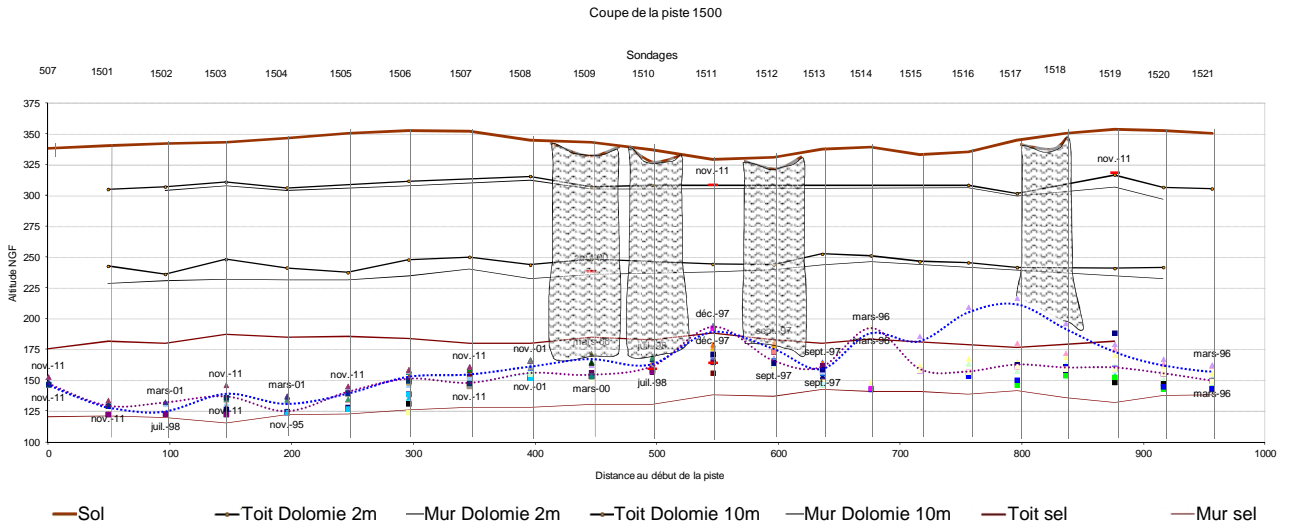
Piste 500 (hors suivi déporté)



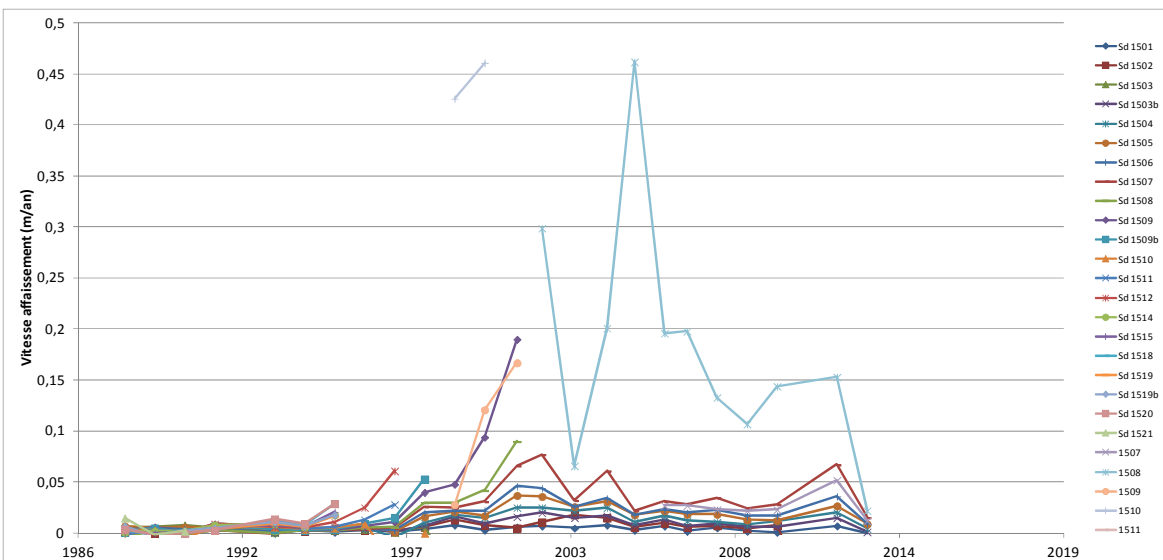
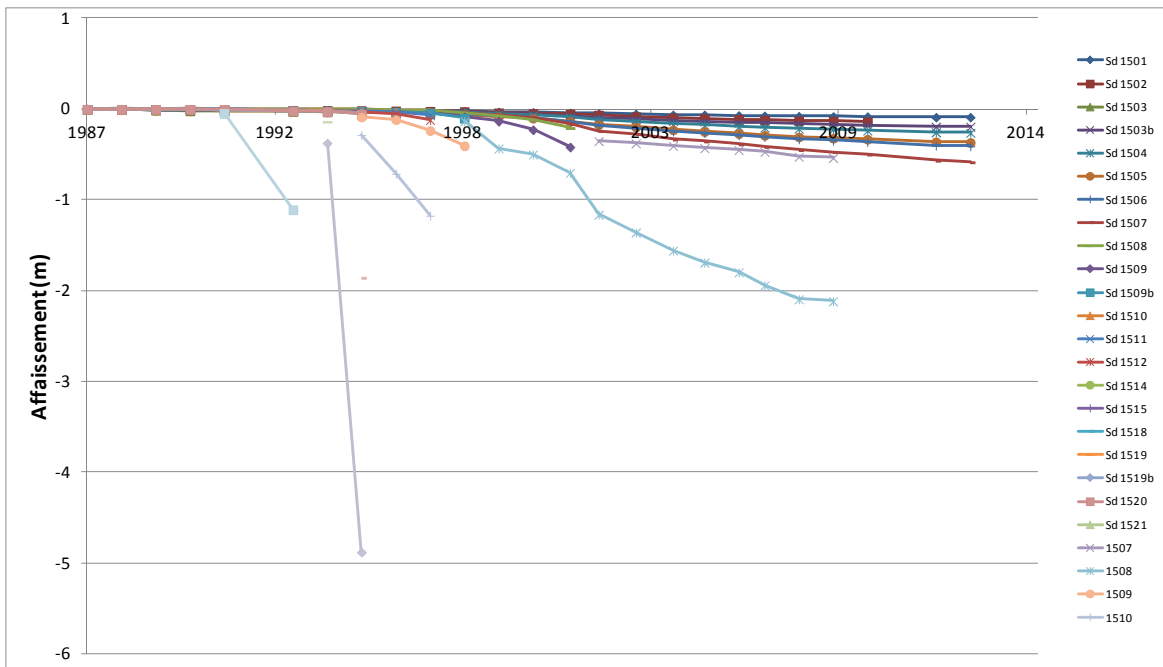
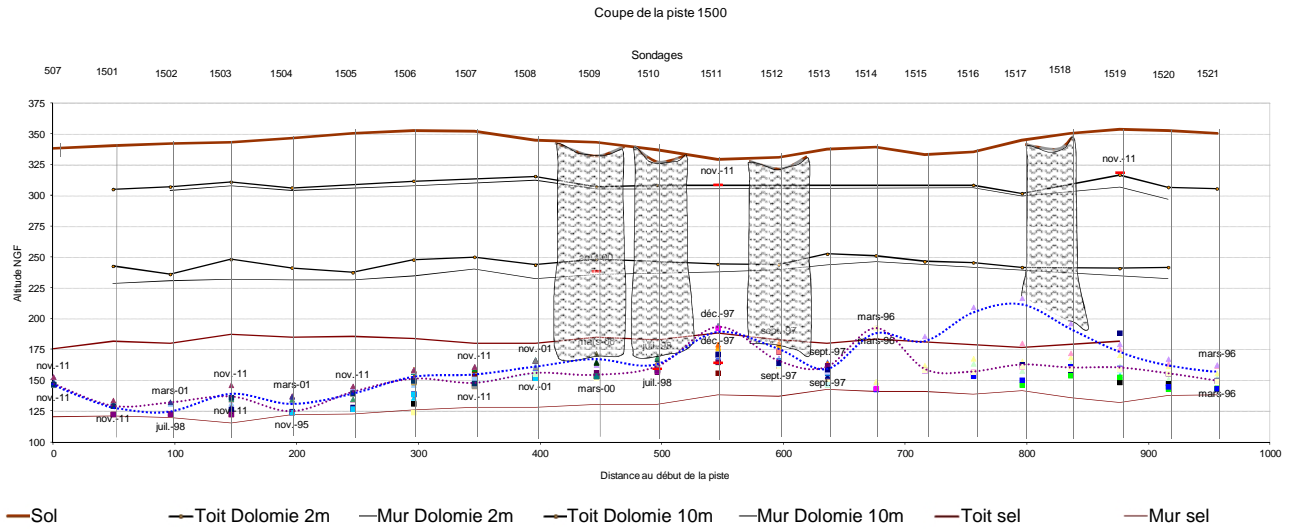
Piste 500 (avec suivi déporté)



Piste 1500 (hors suivi déporté)

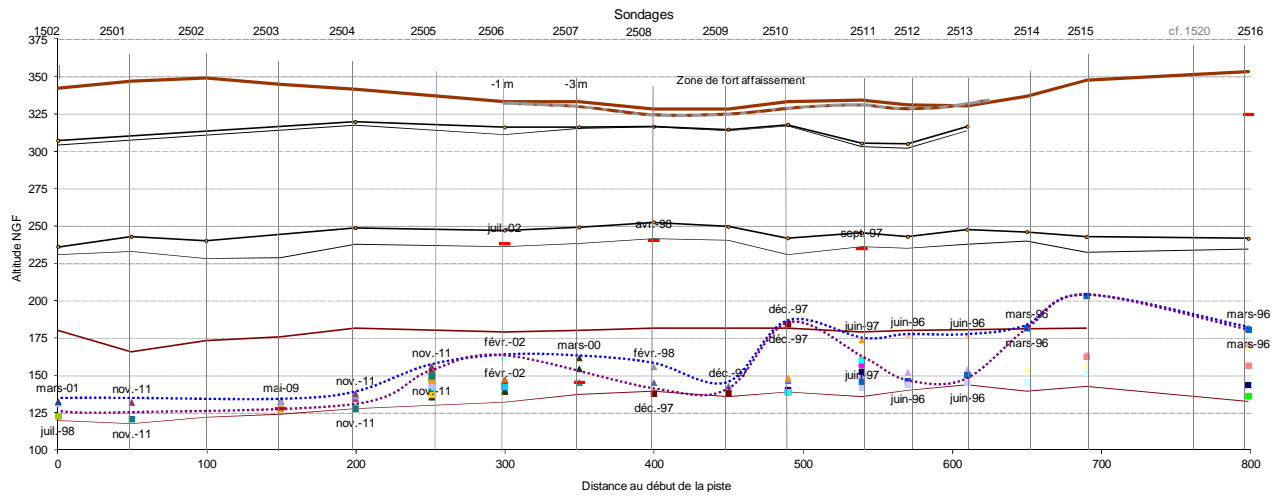


Piste 1500 (avec suivi déporté)

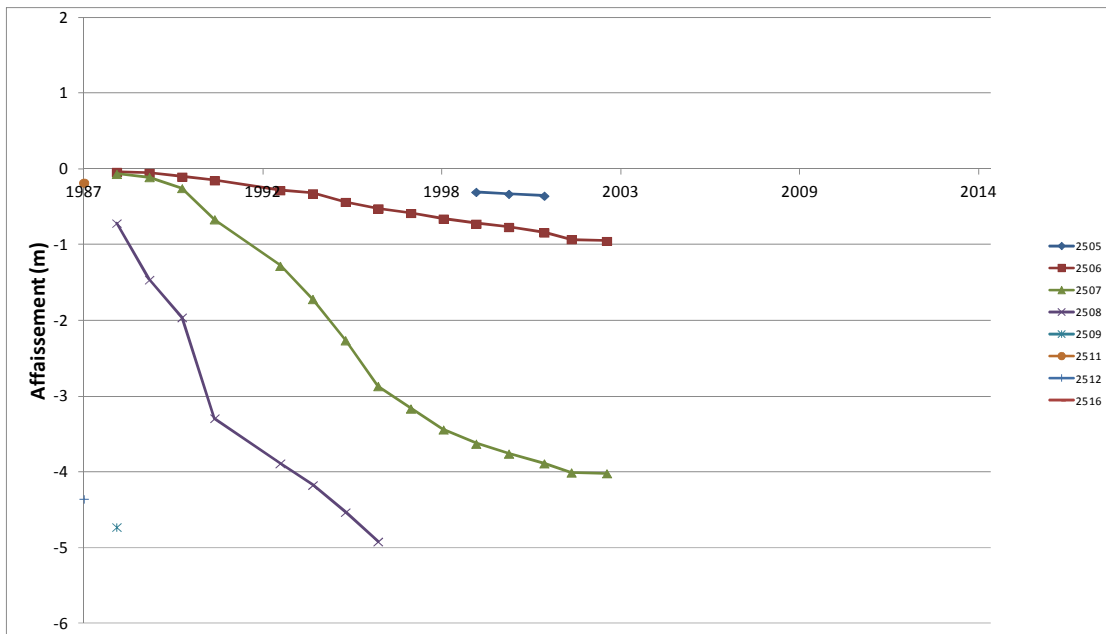


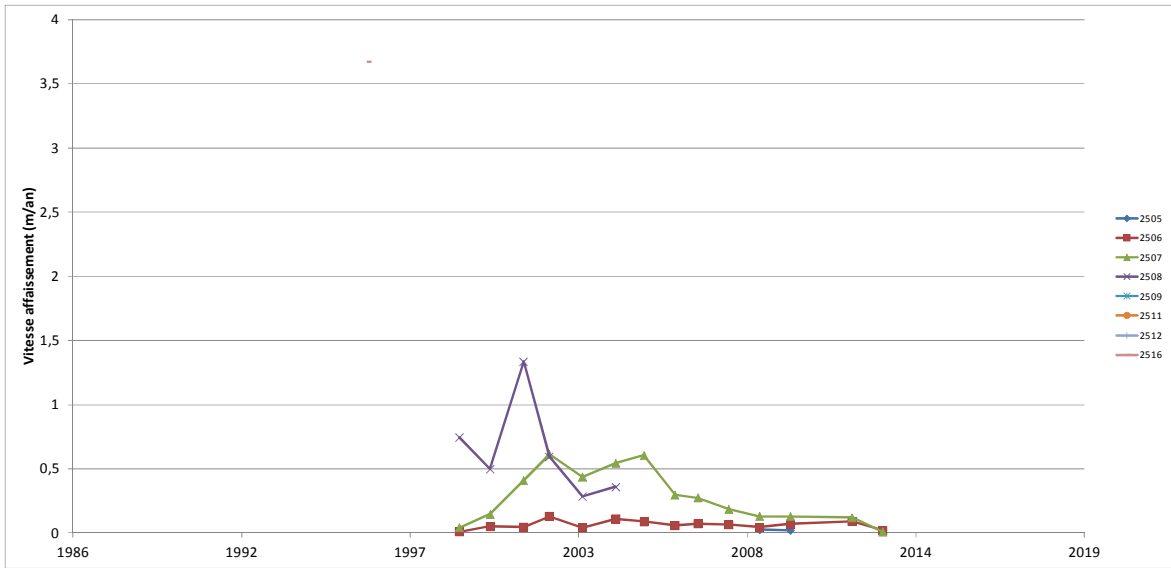
Piste 2500

Coupe de la piste 2500

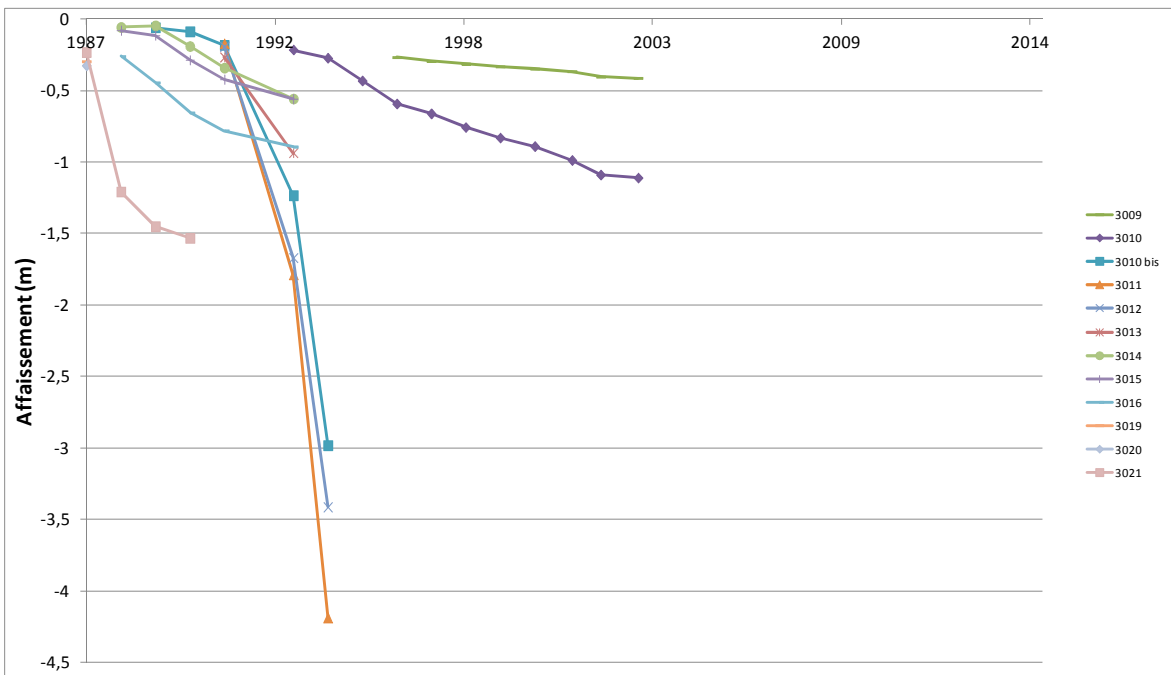
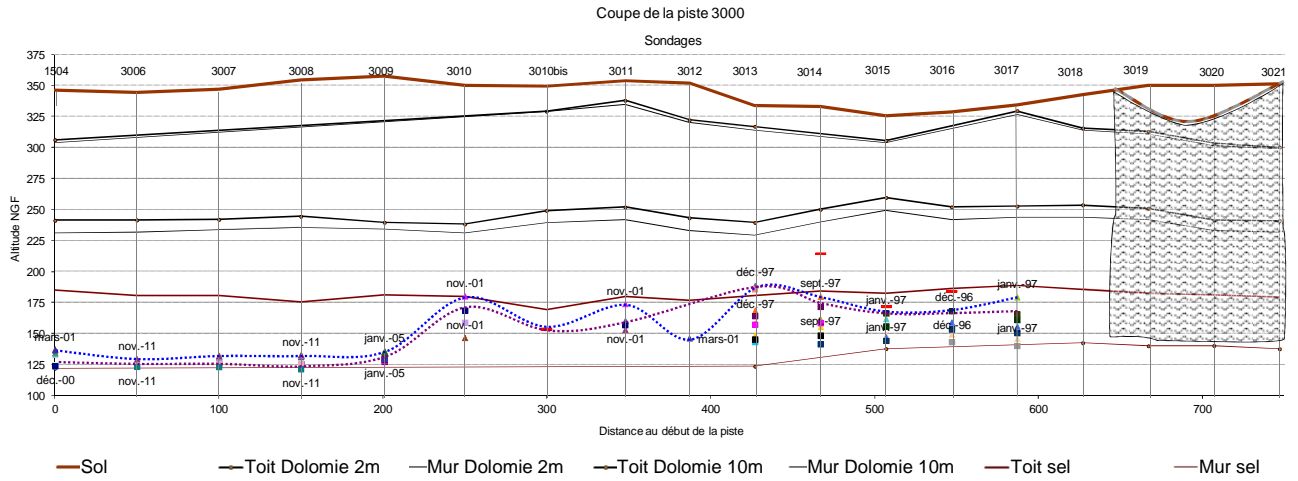


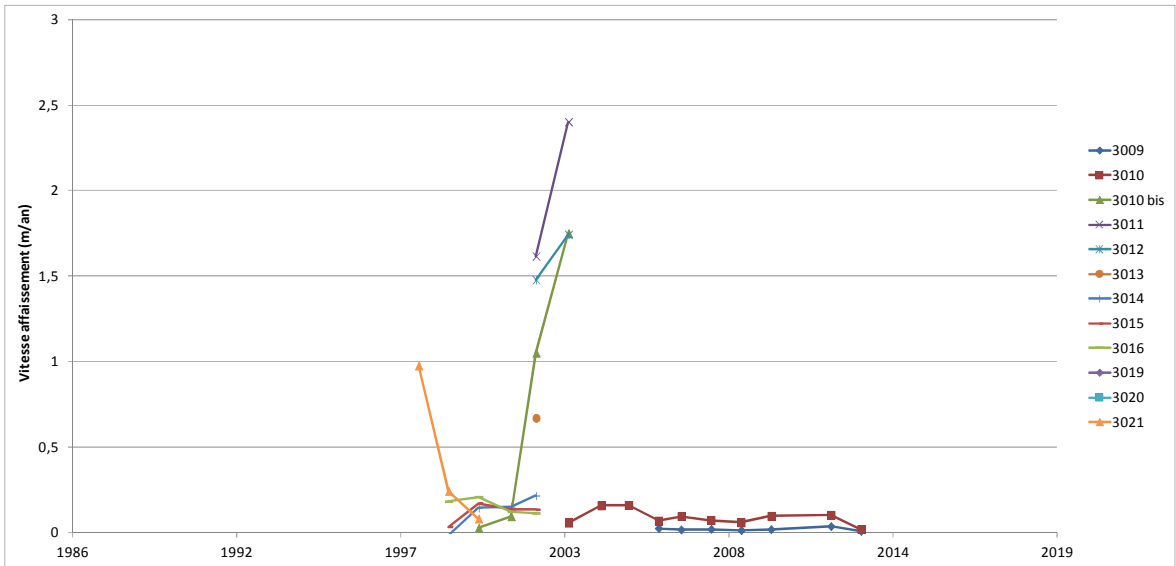
— Sol — Toit Dolomie 2m — Mur Dolomie 2m — Toit Dolomie 10m — Mur Dolomie 10m — Toit sel — Mur sel





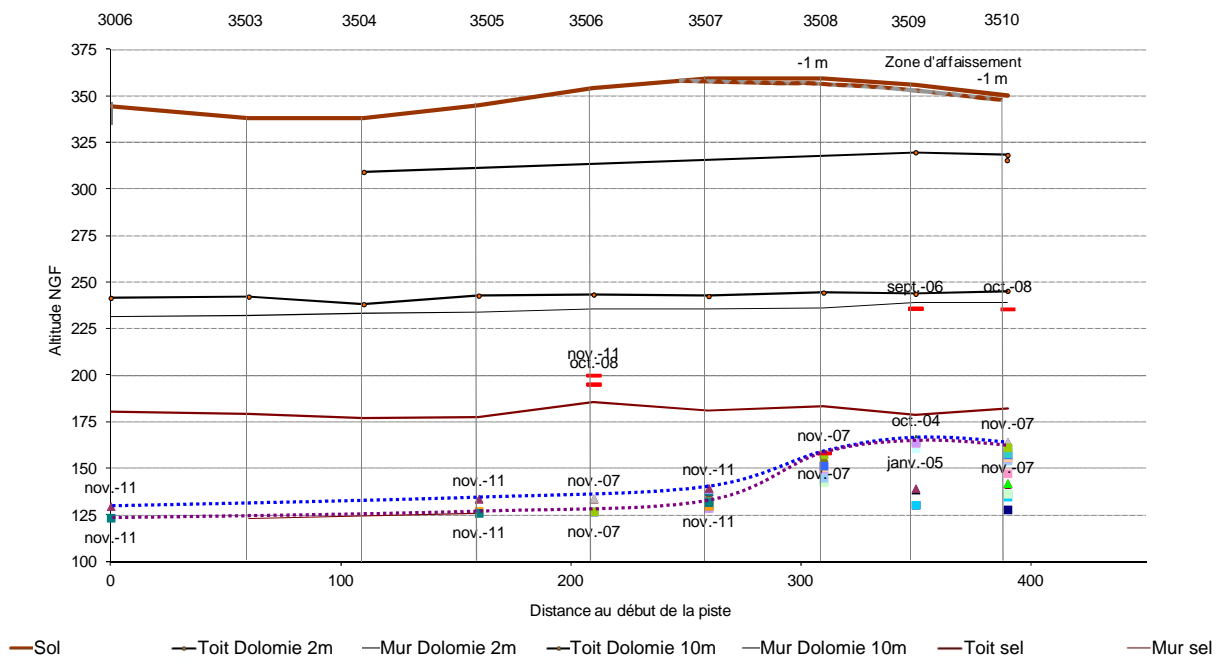
Piste 3000

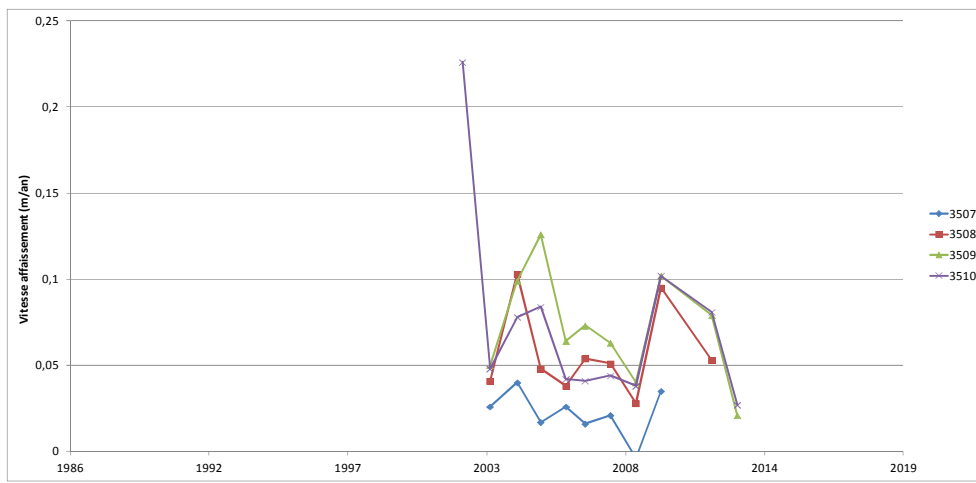
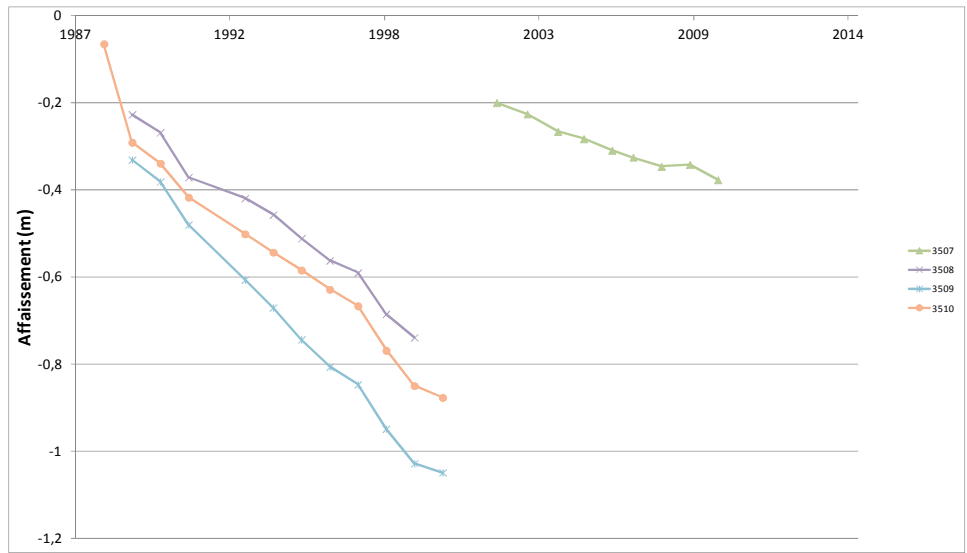




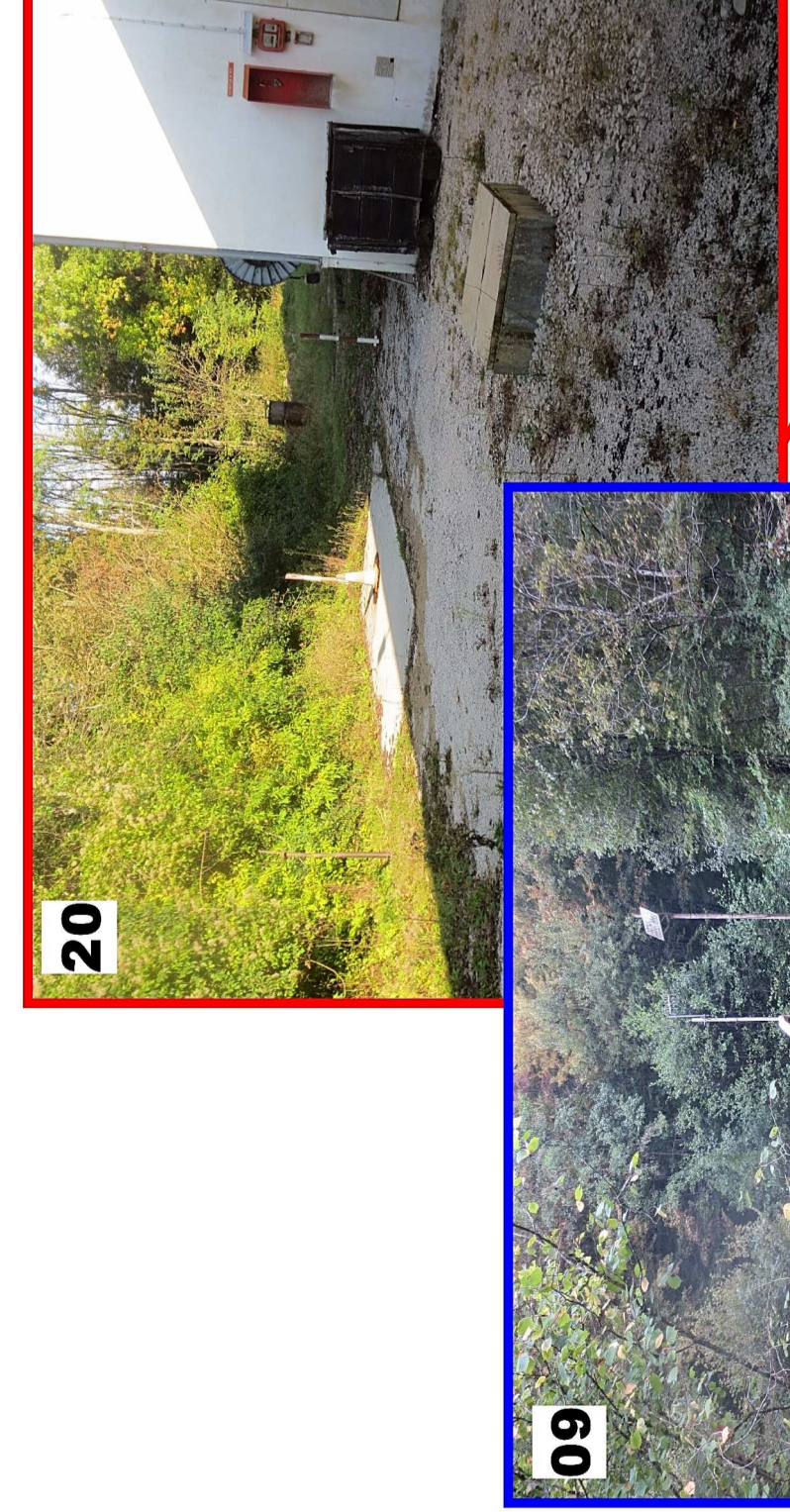
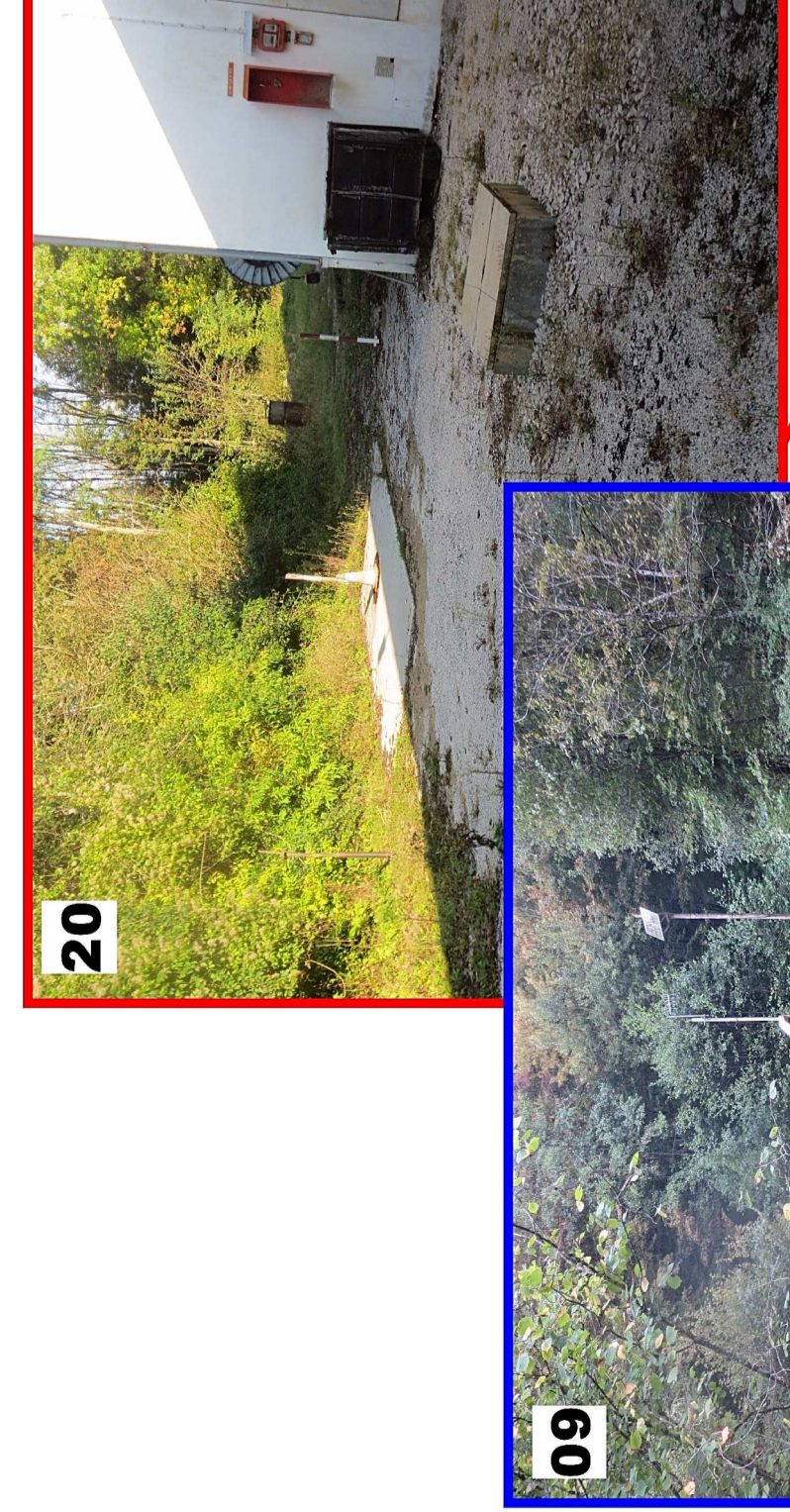
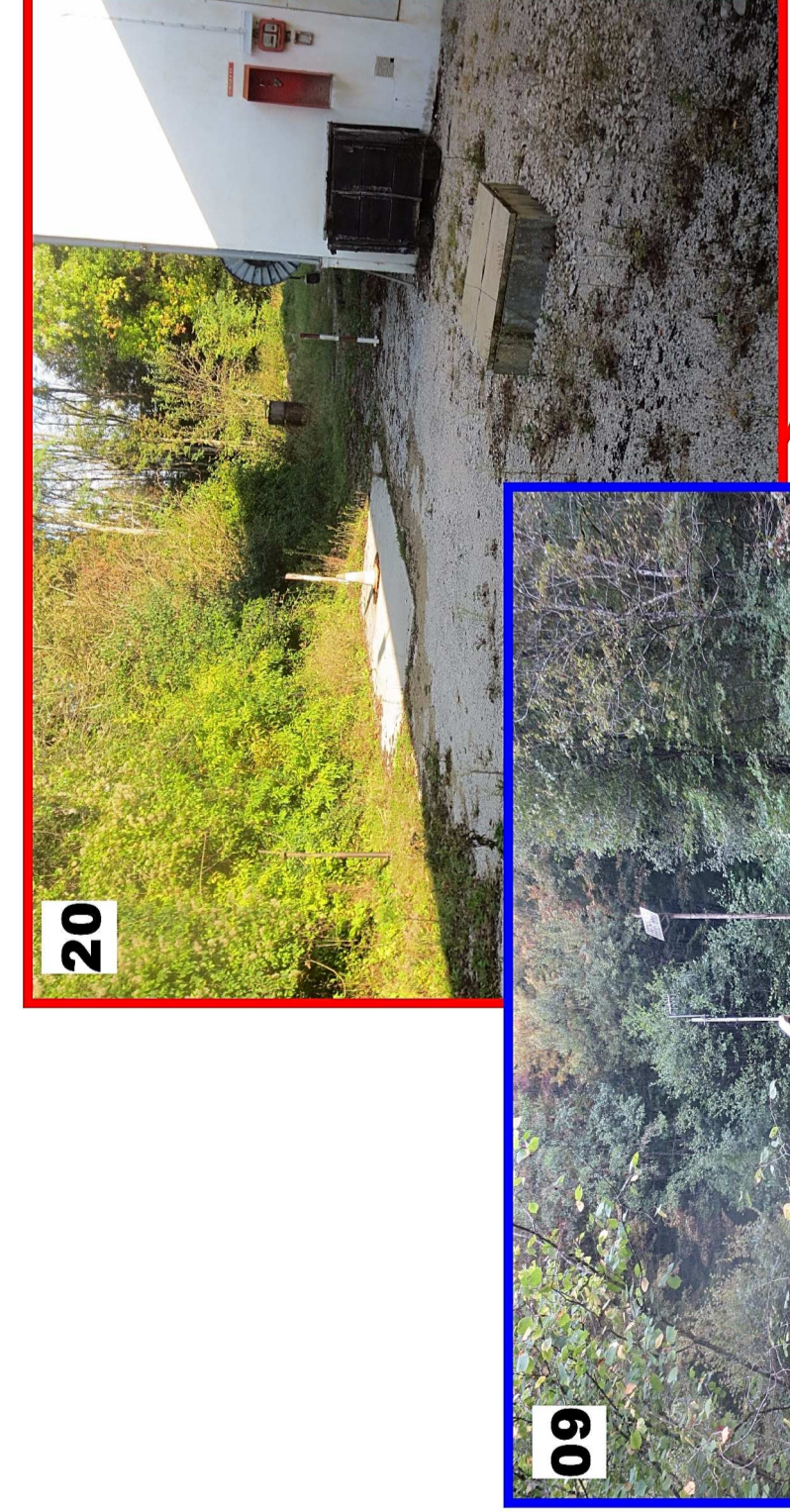
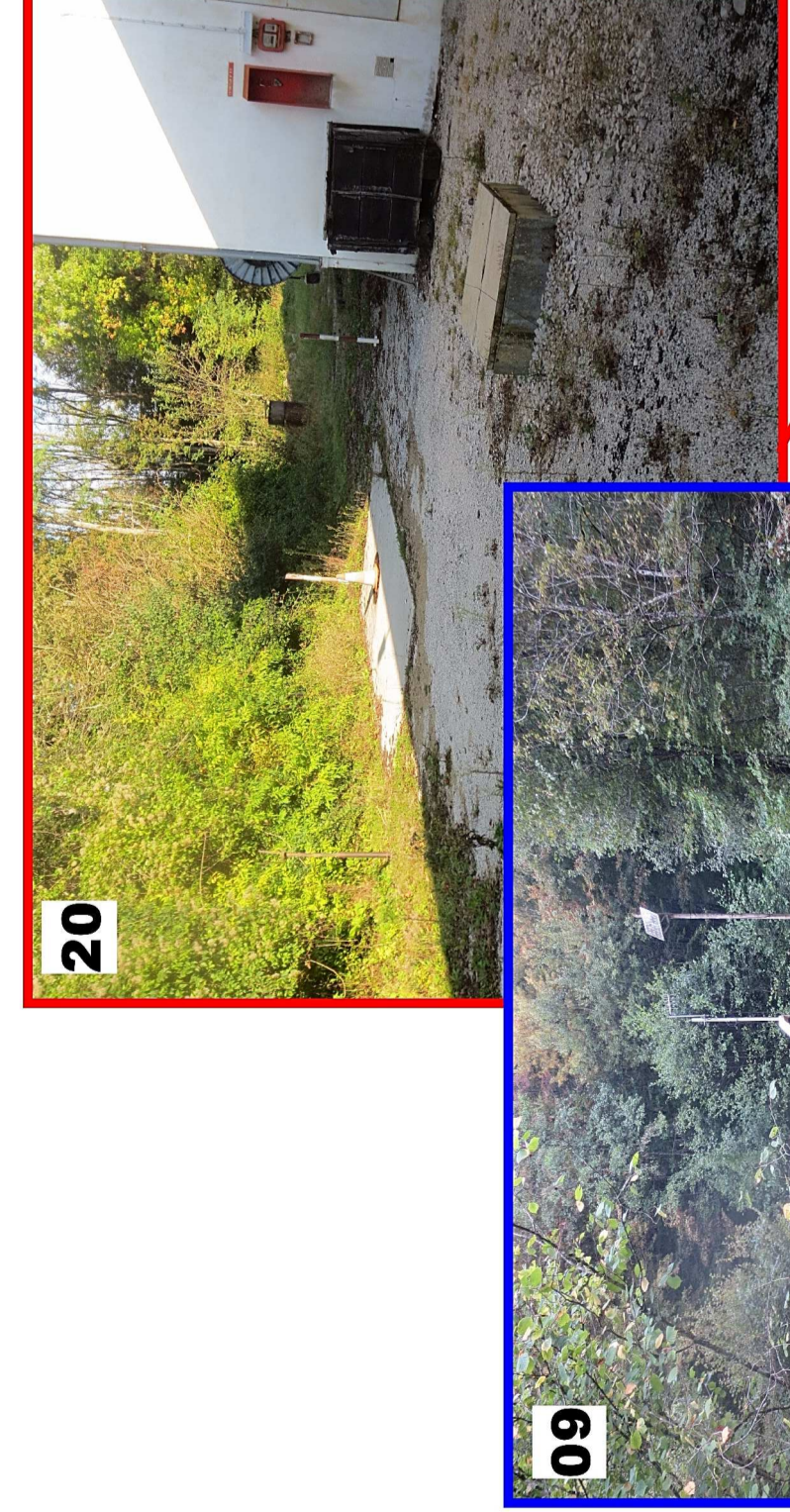
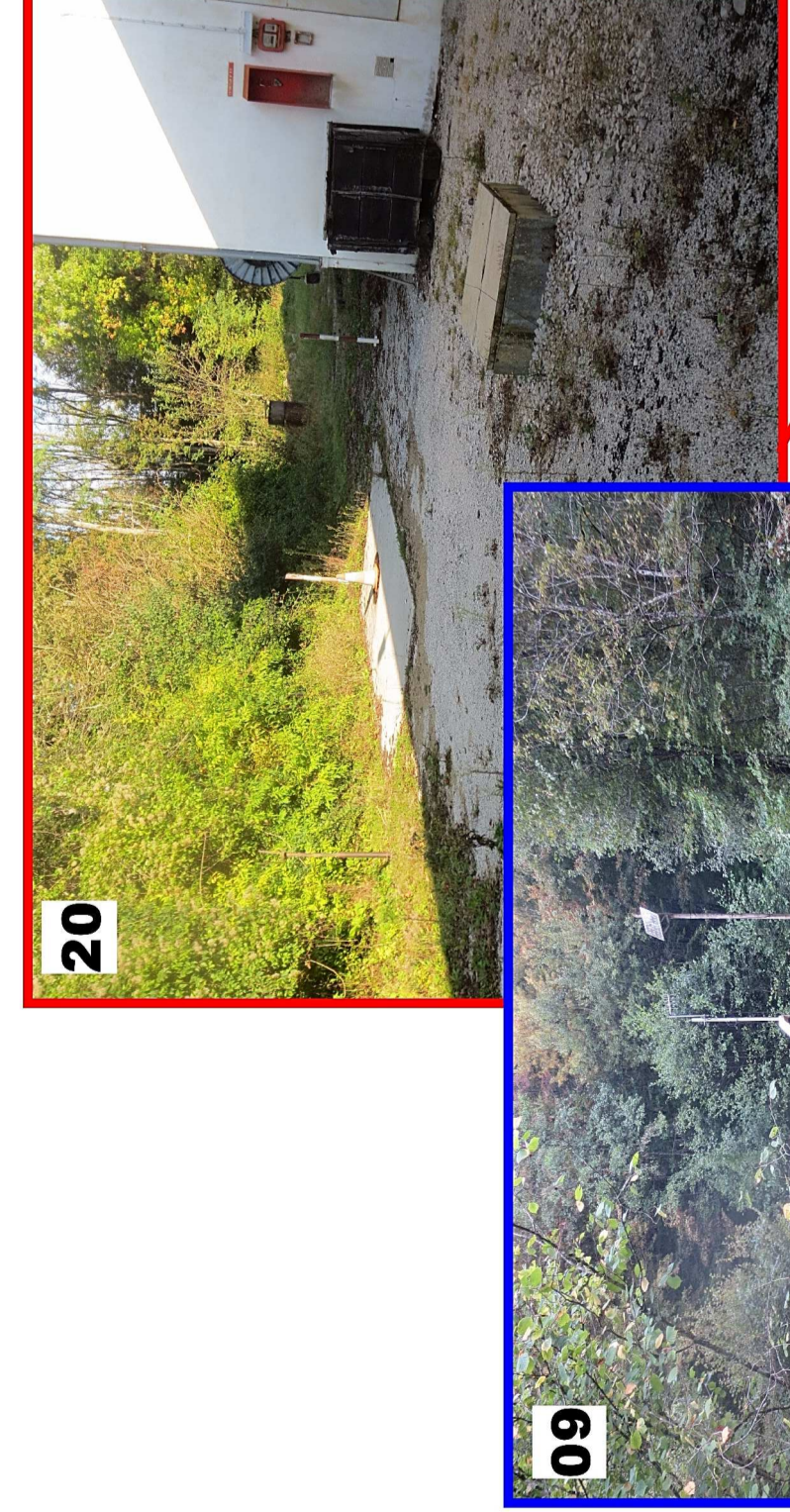
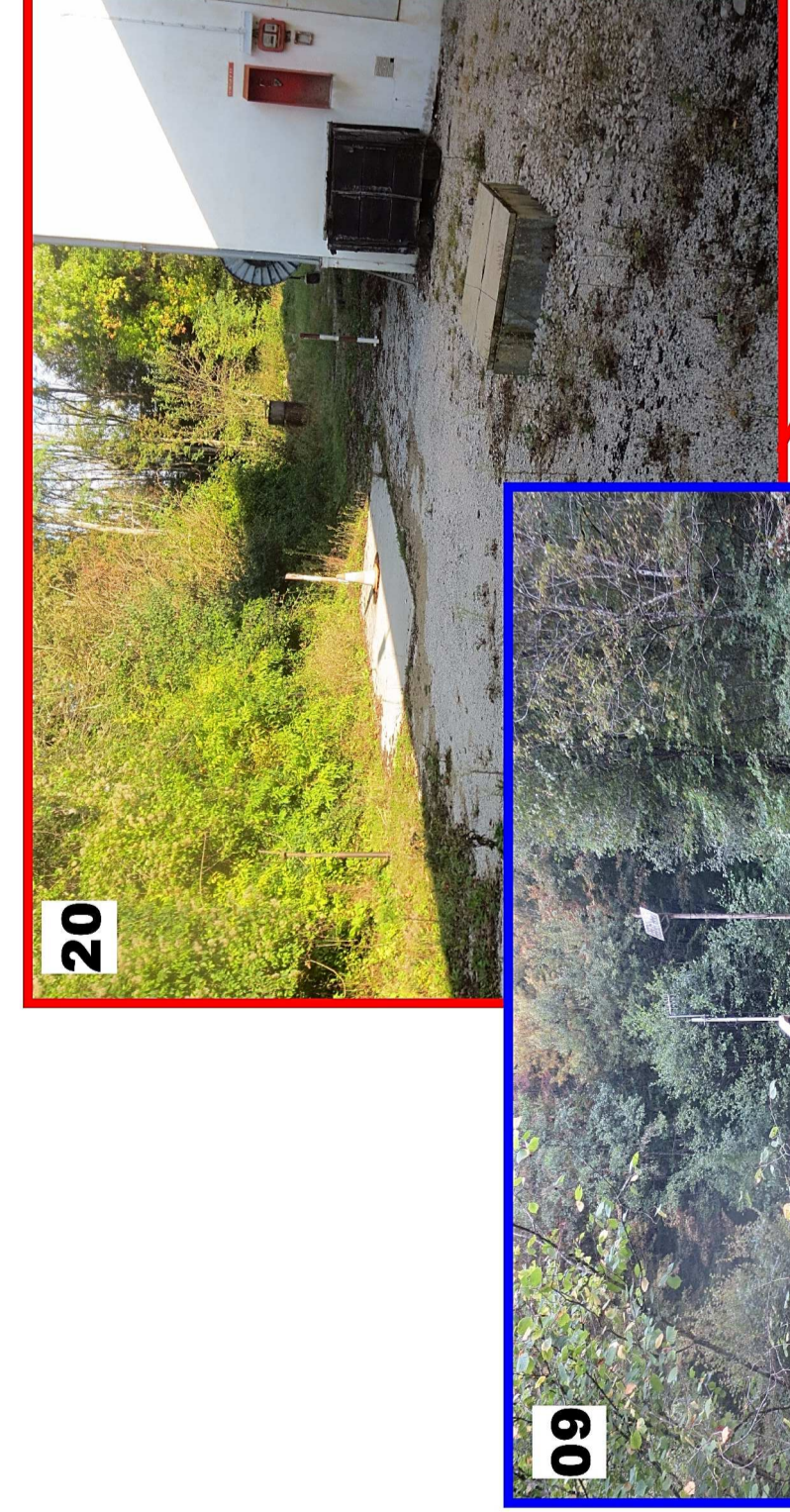
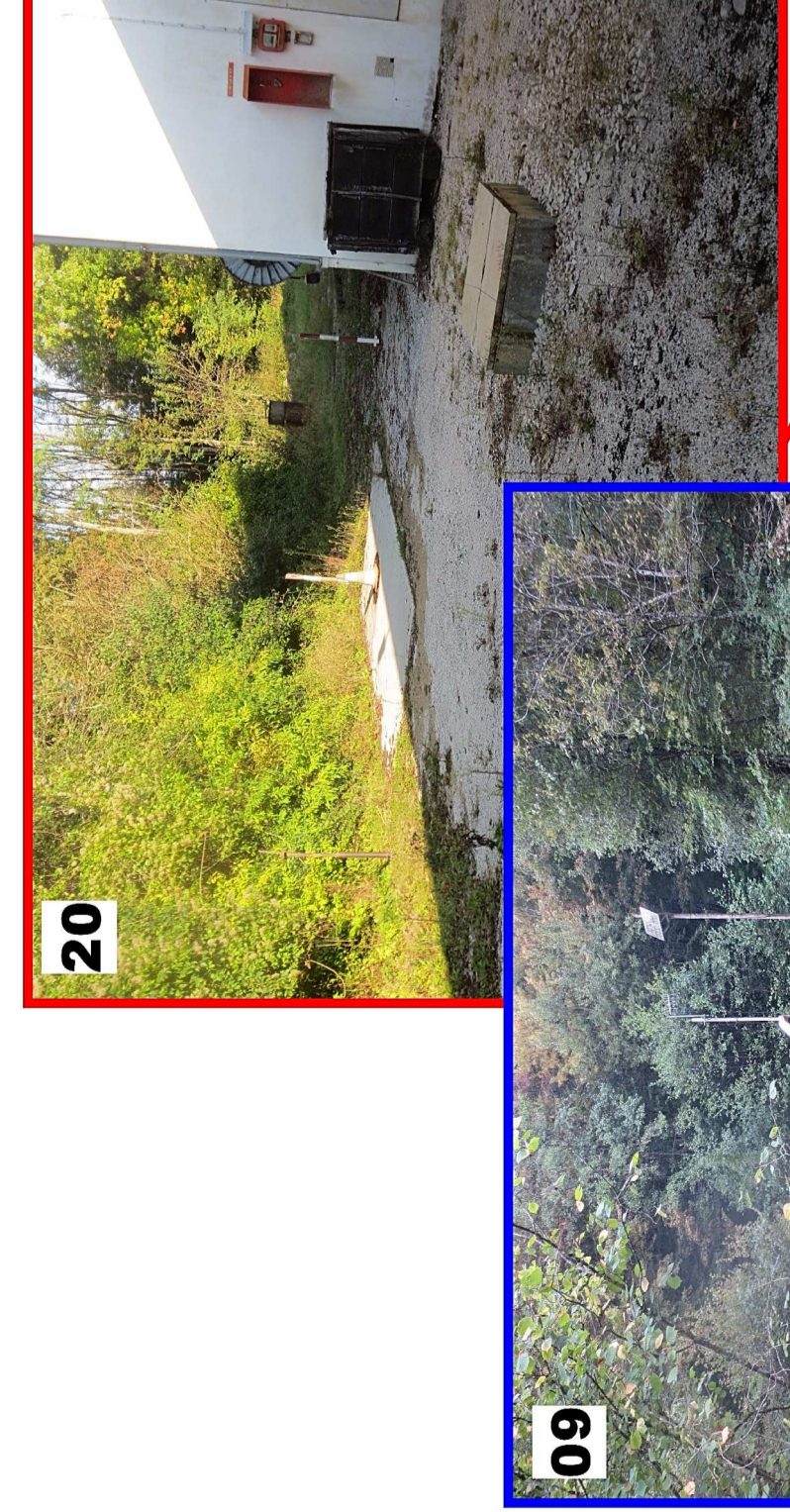
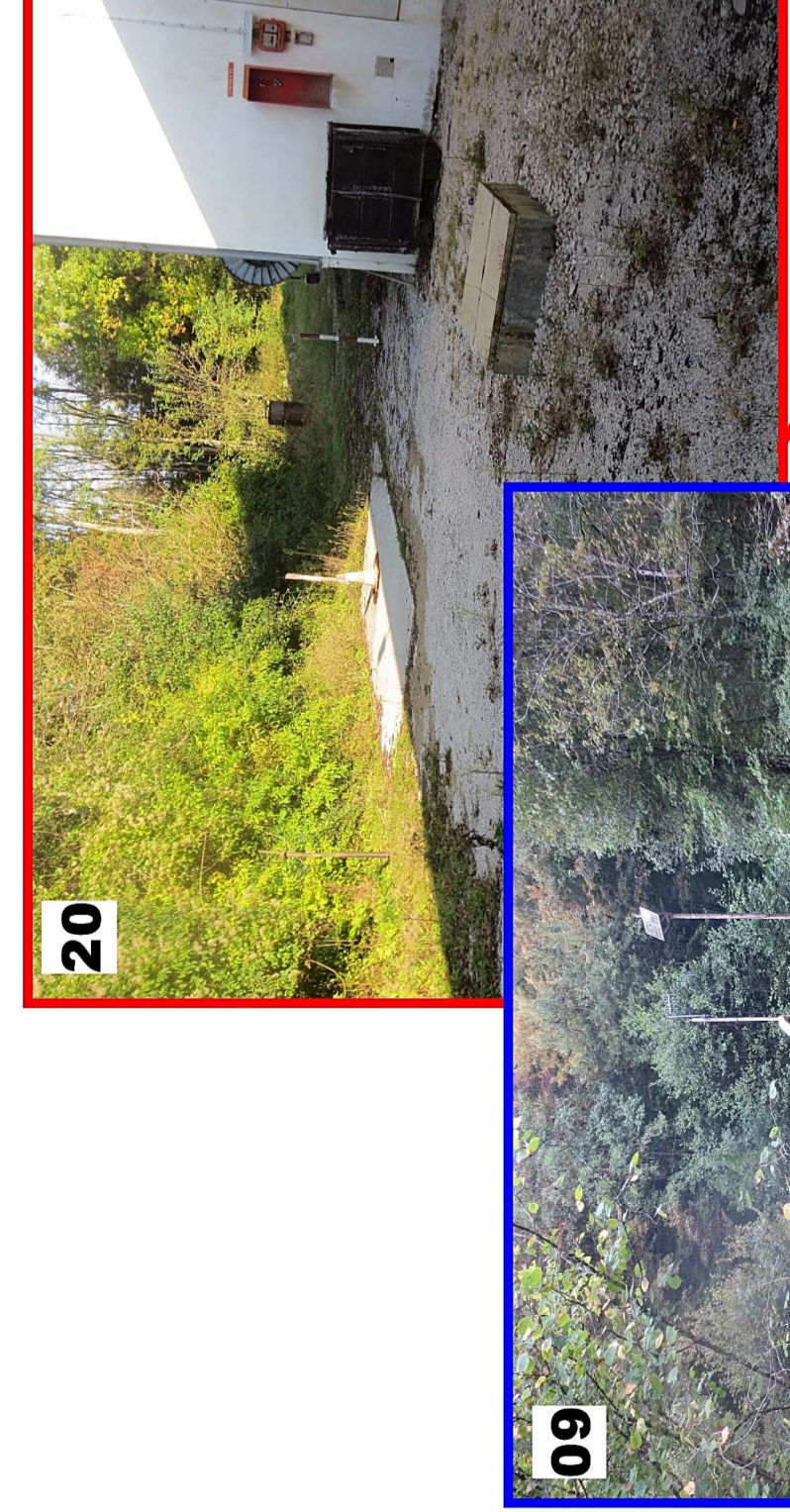
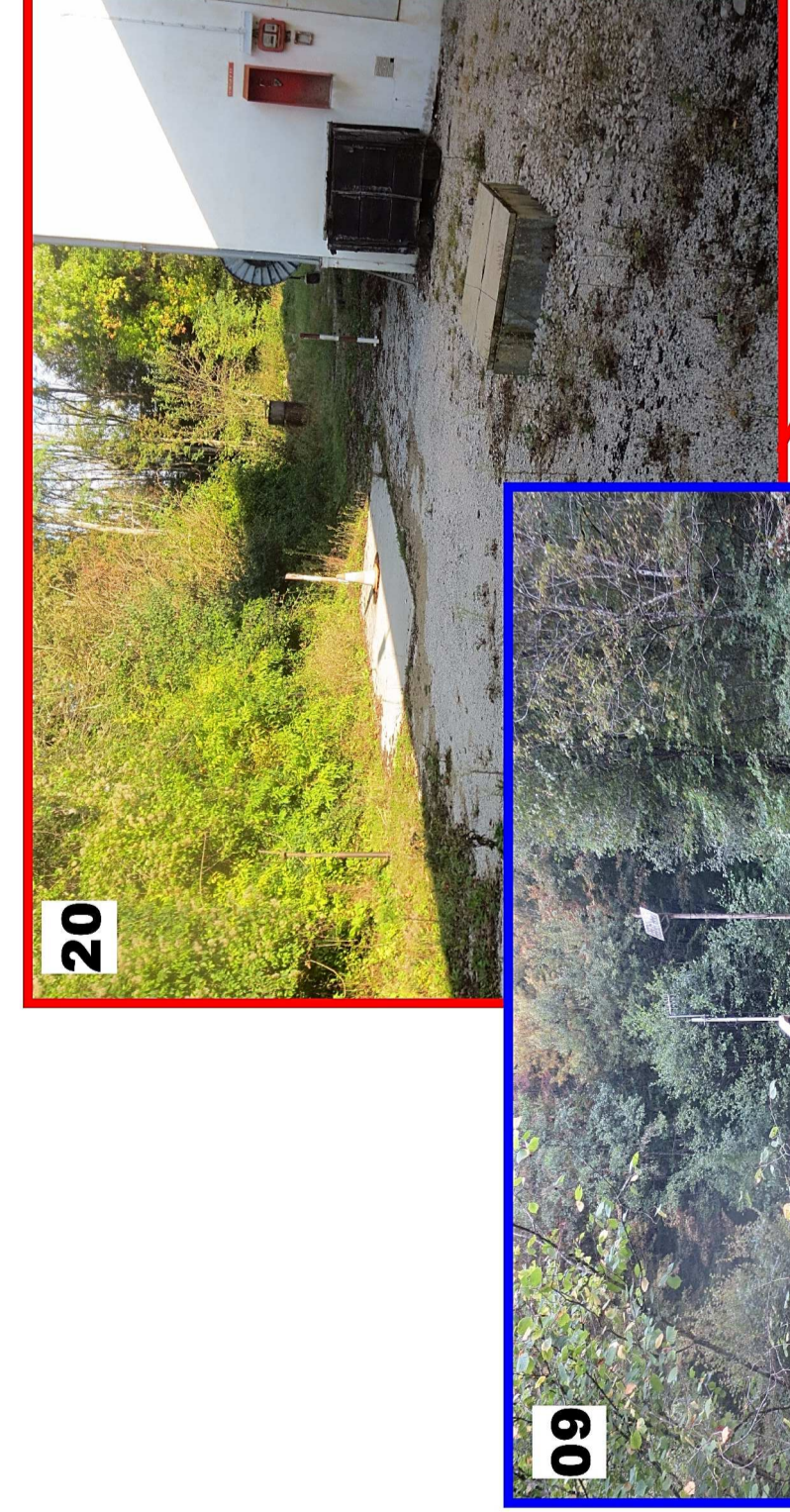
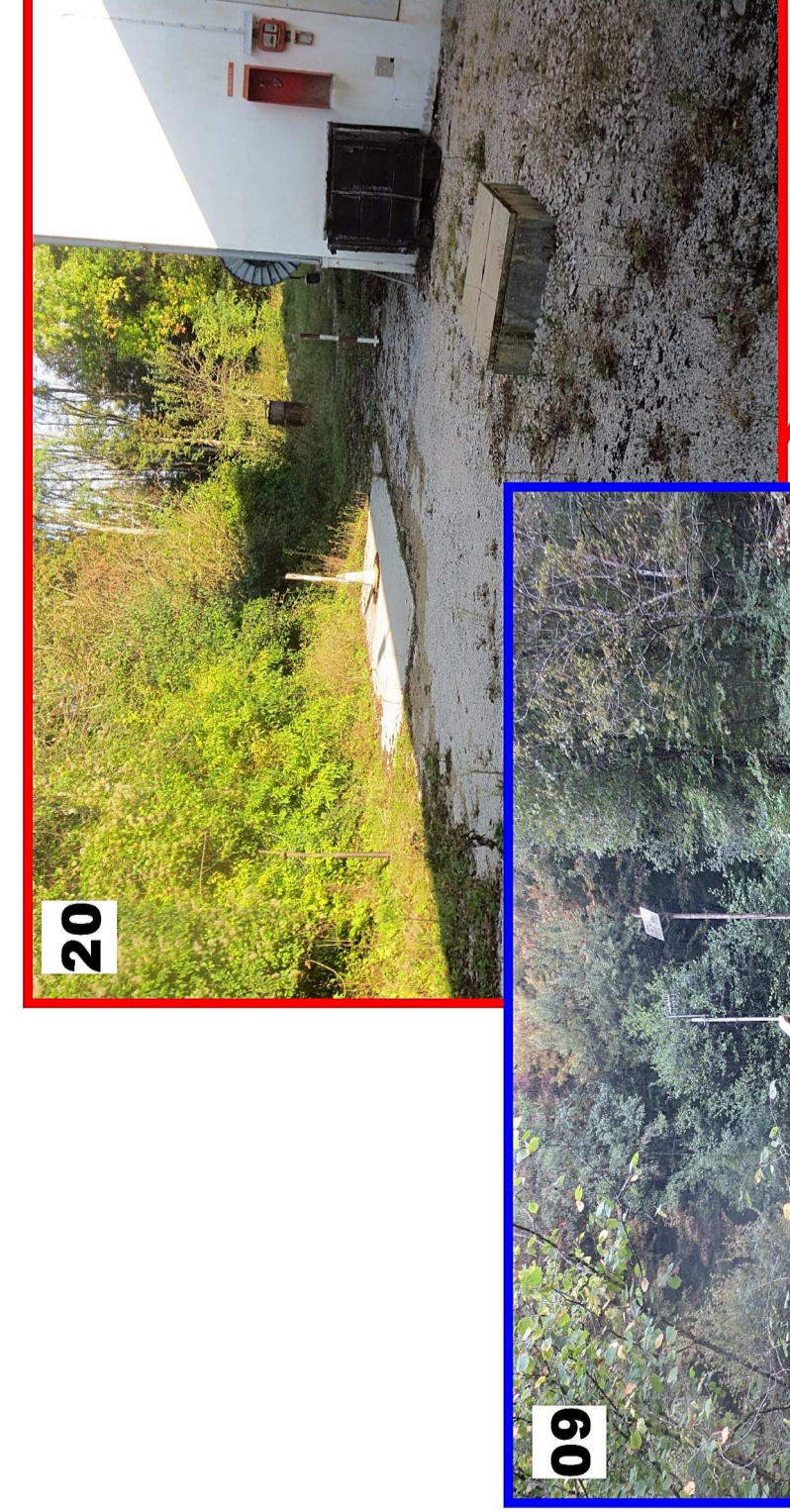
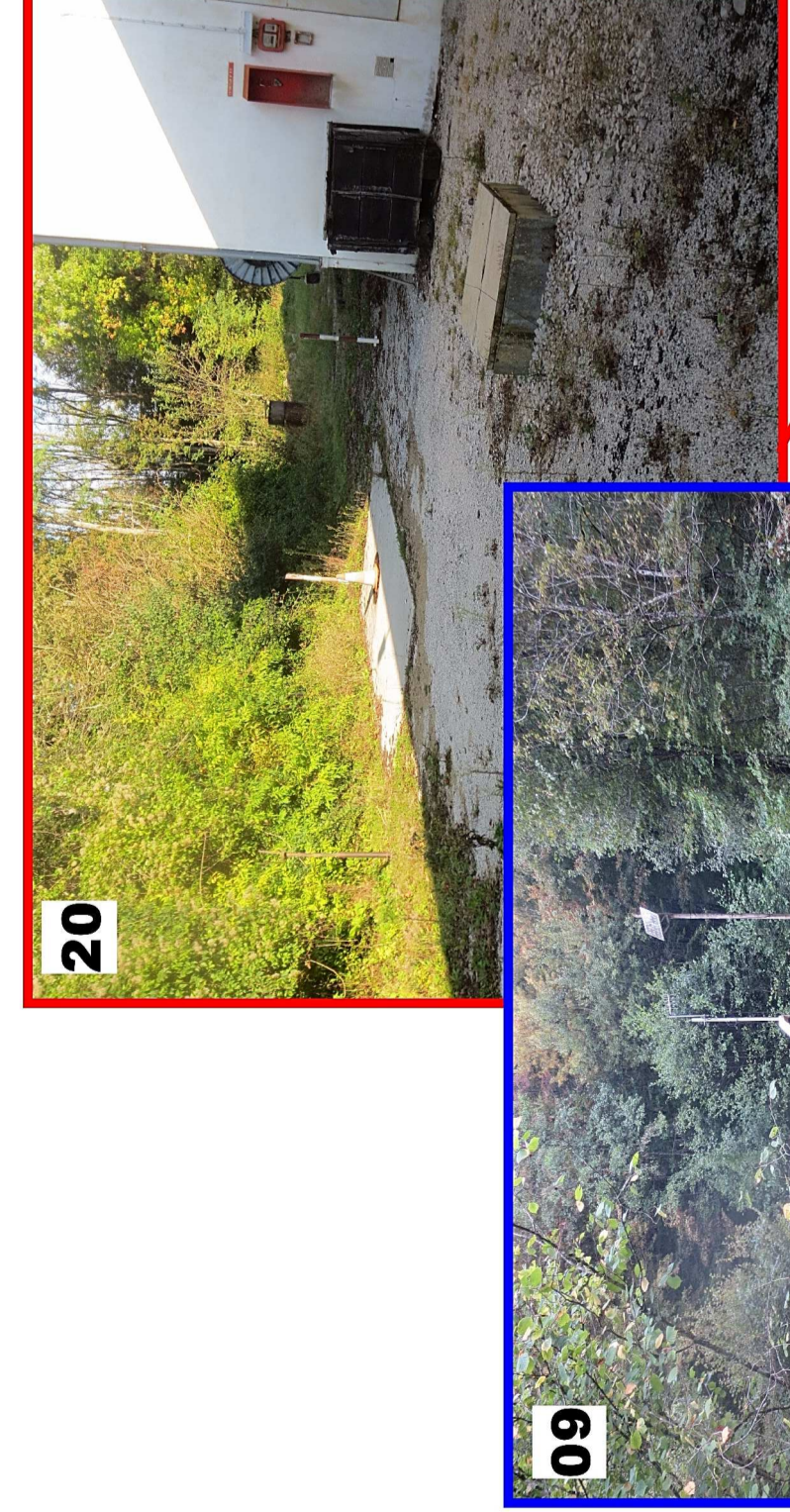
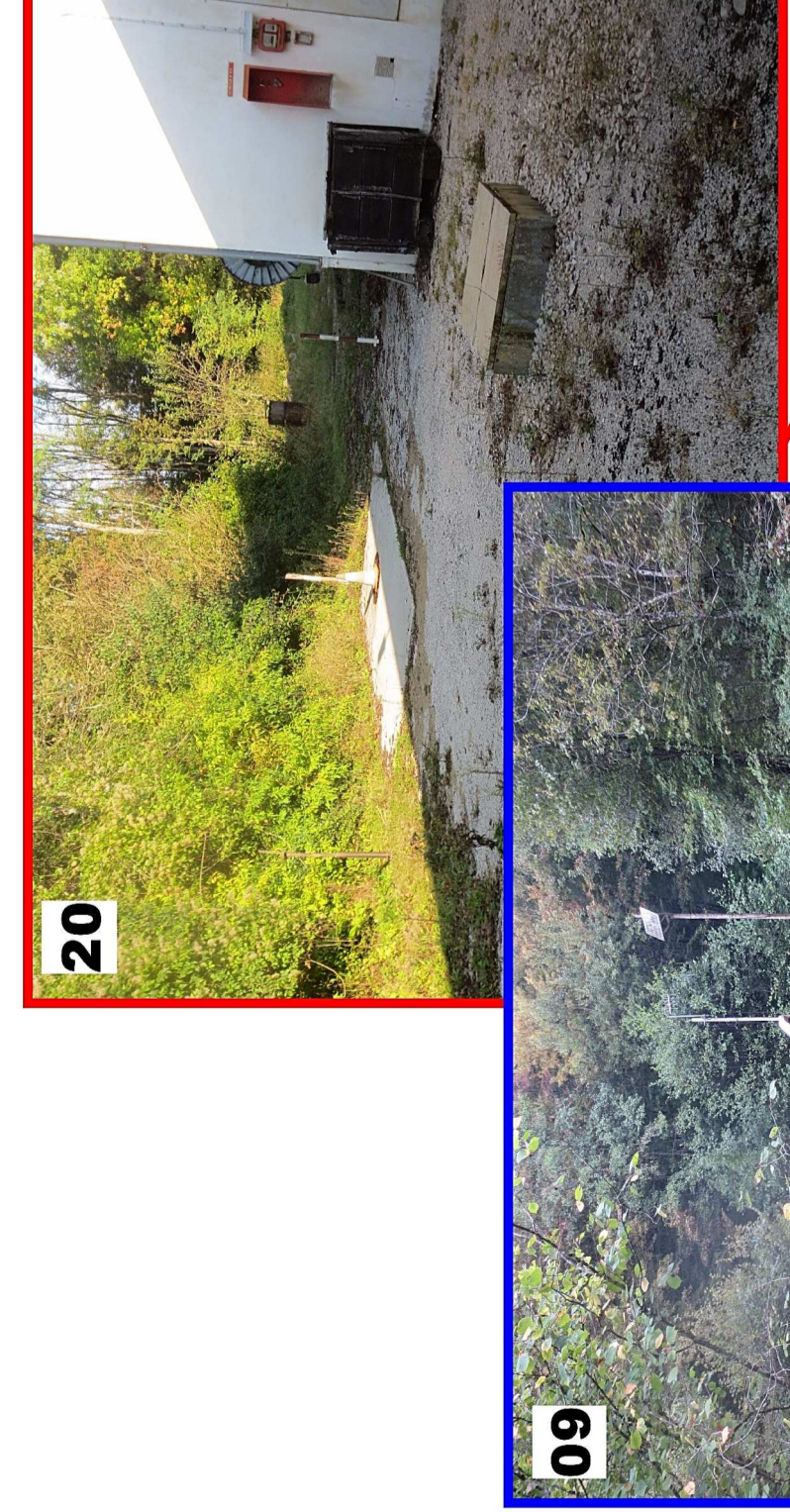
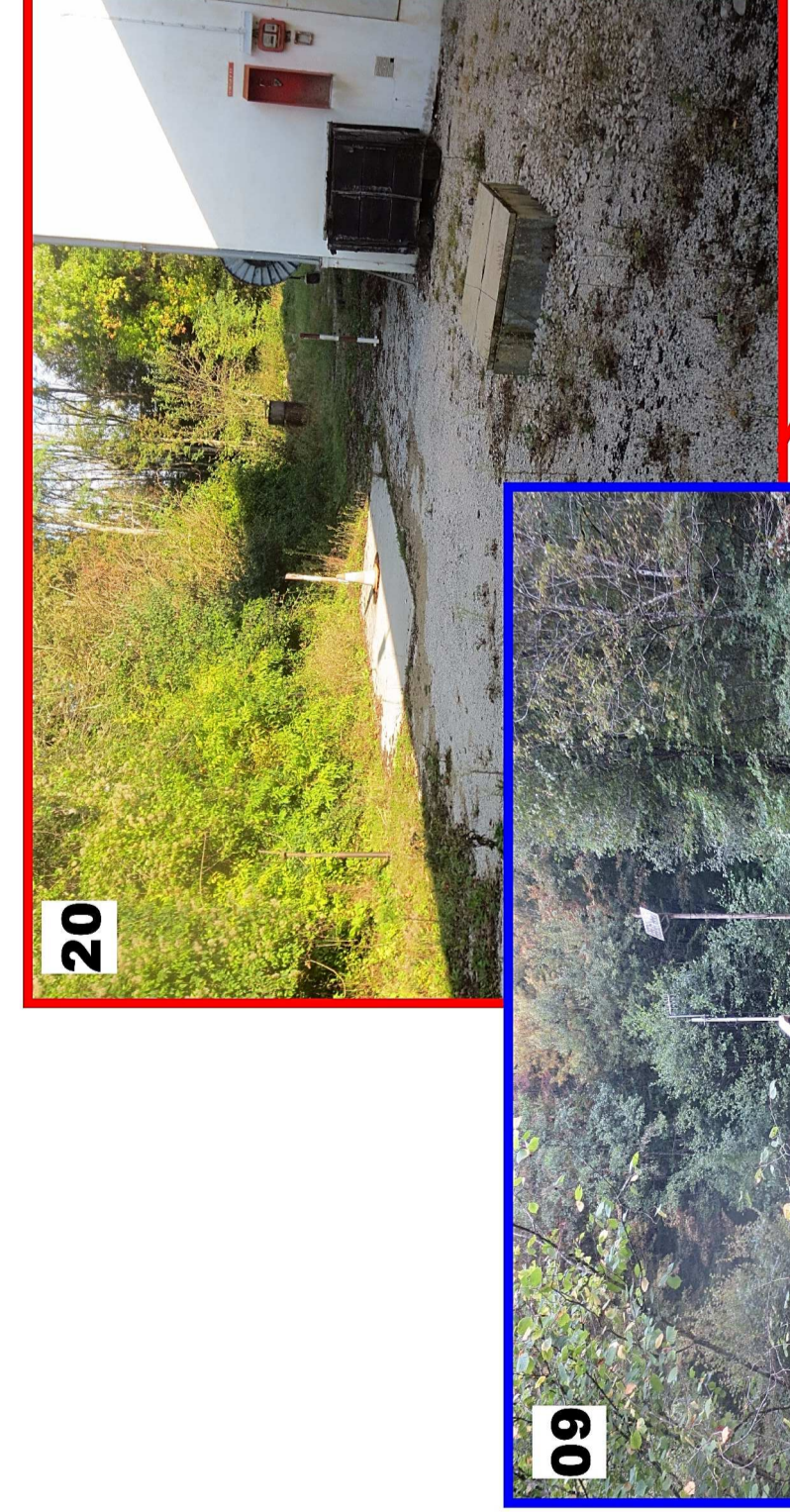
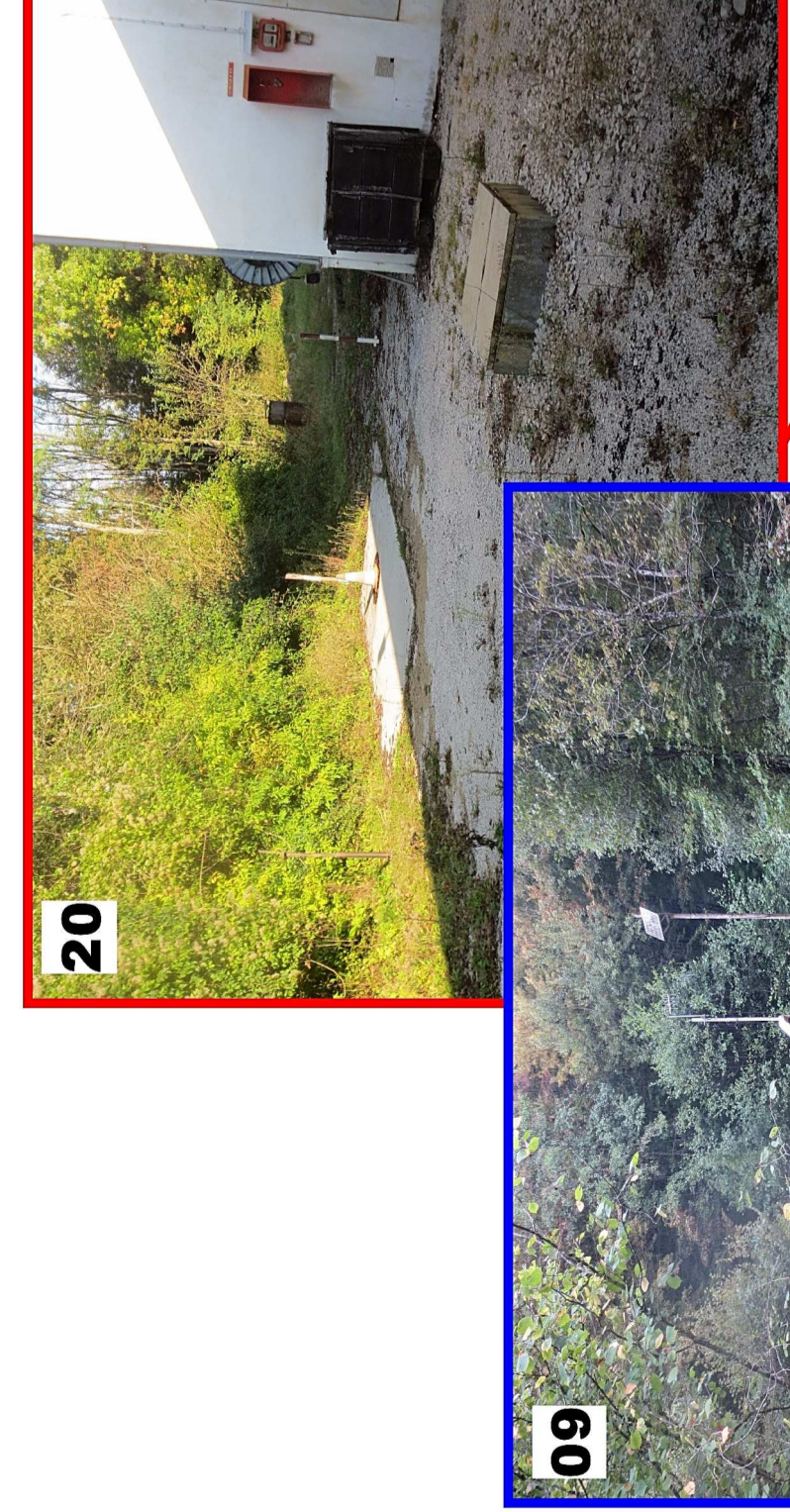
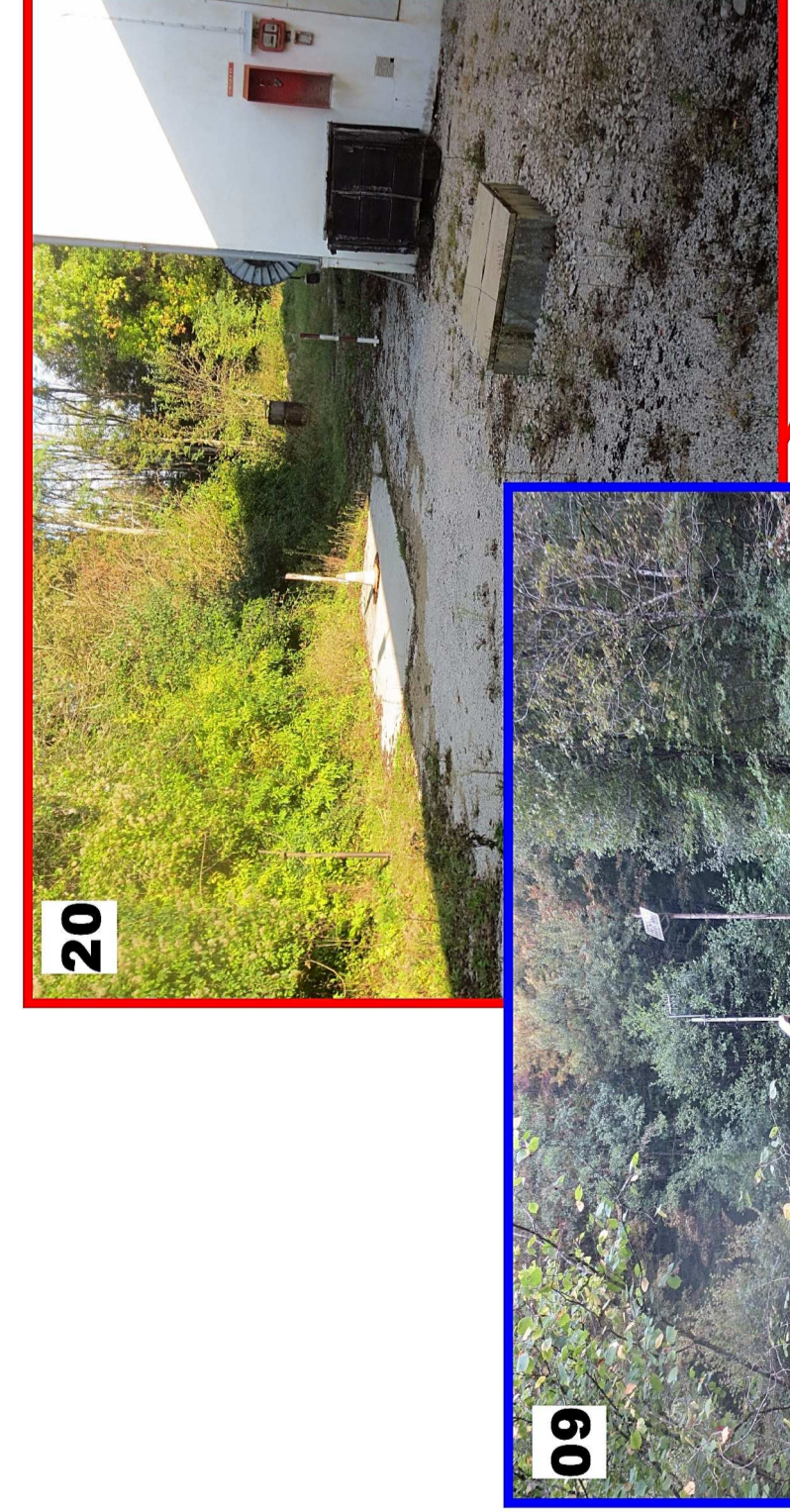
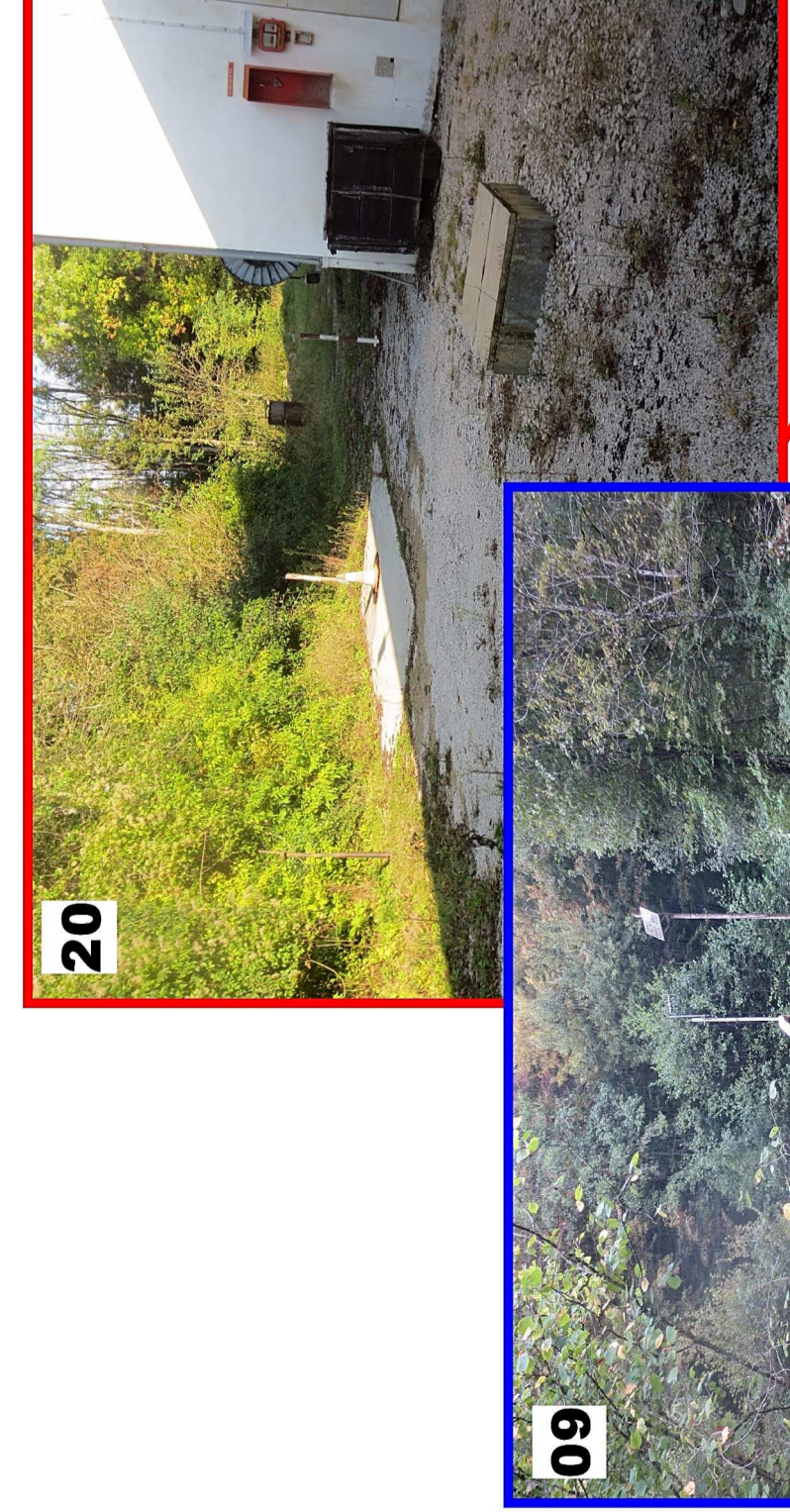
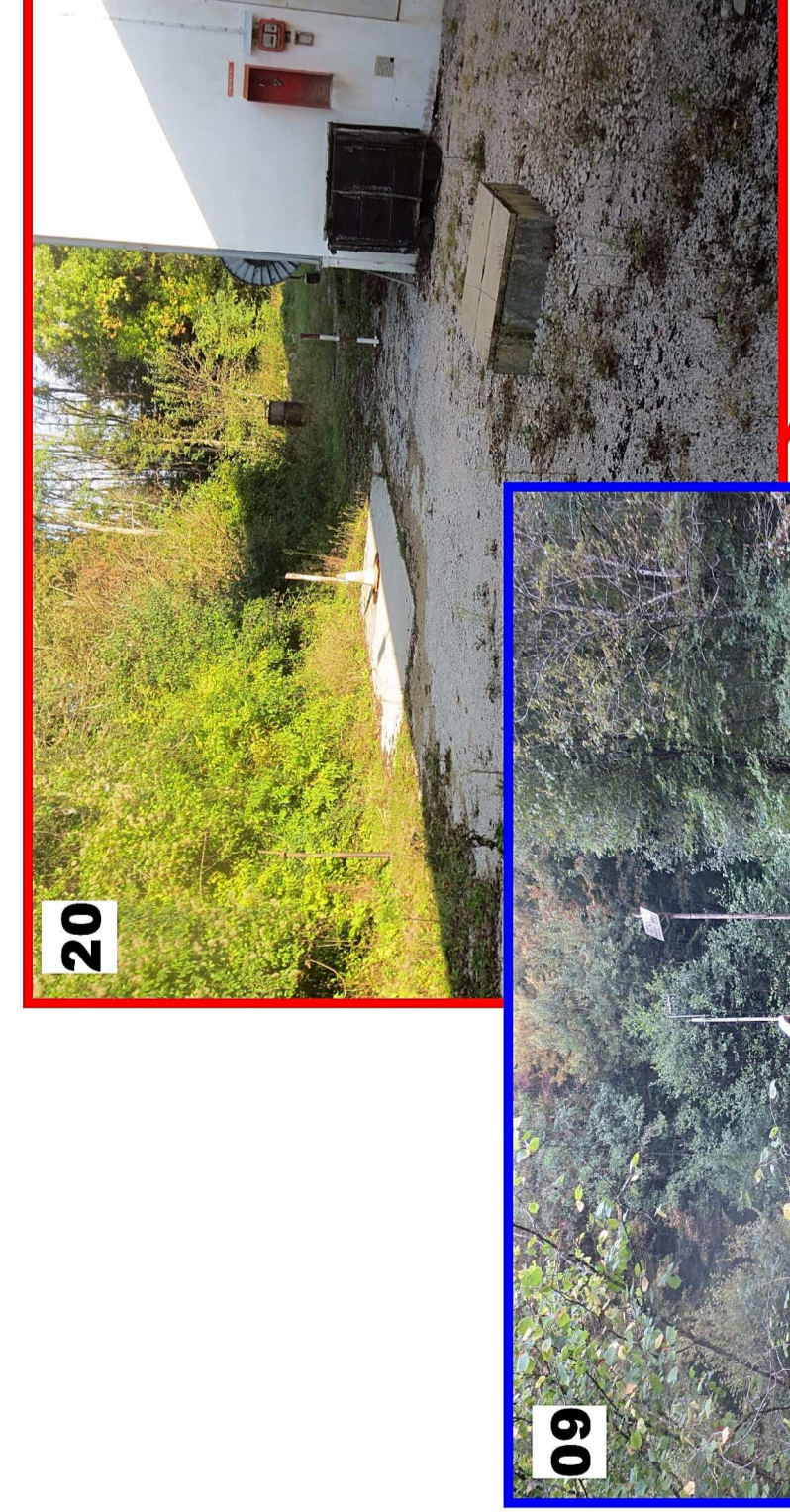
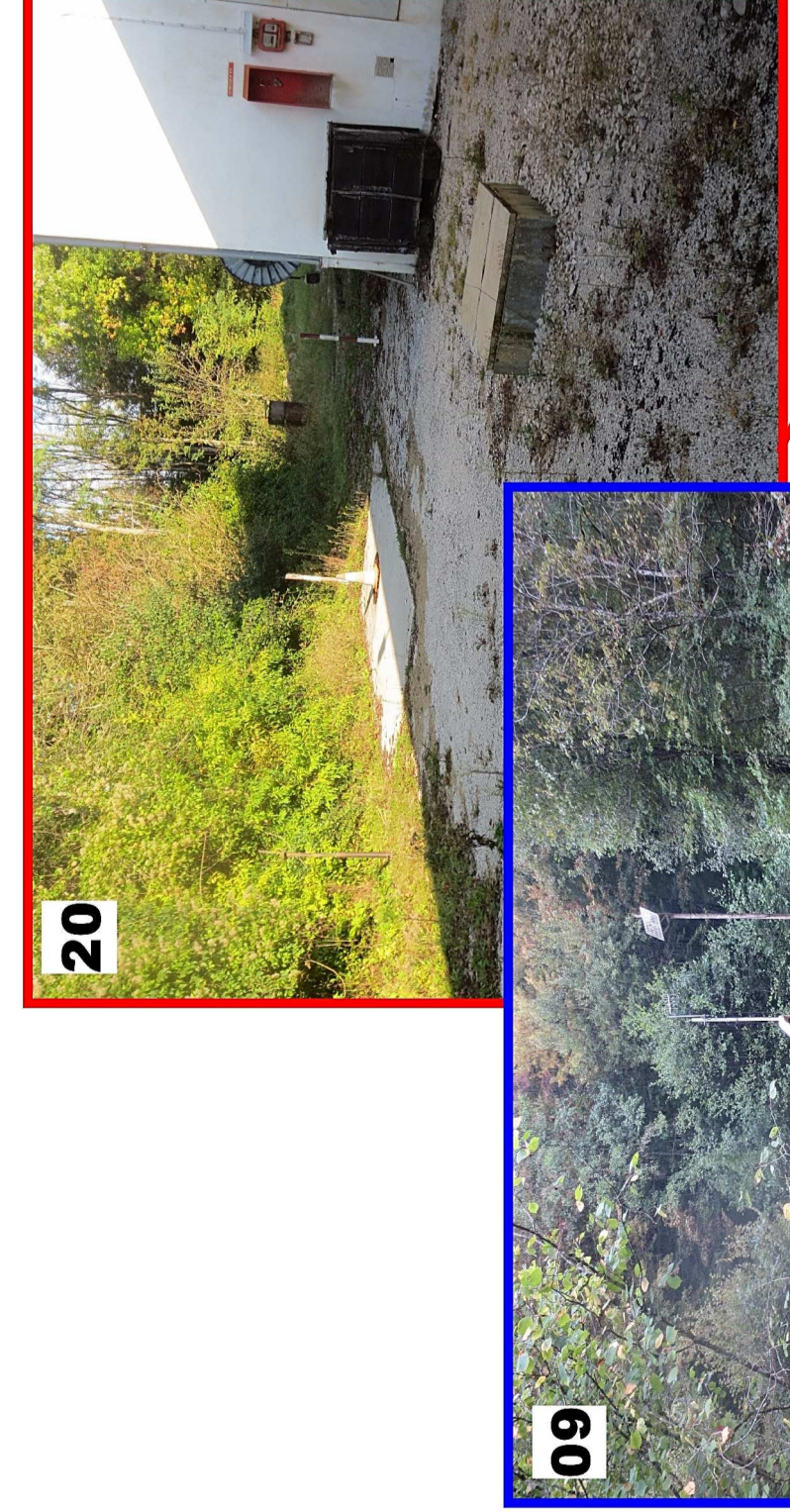
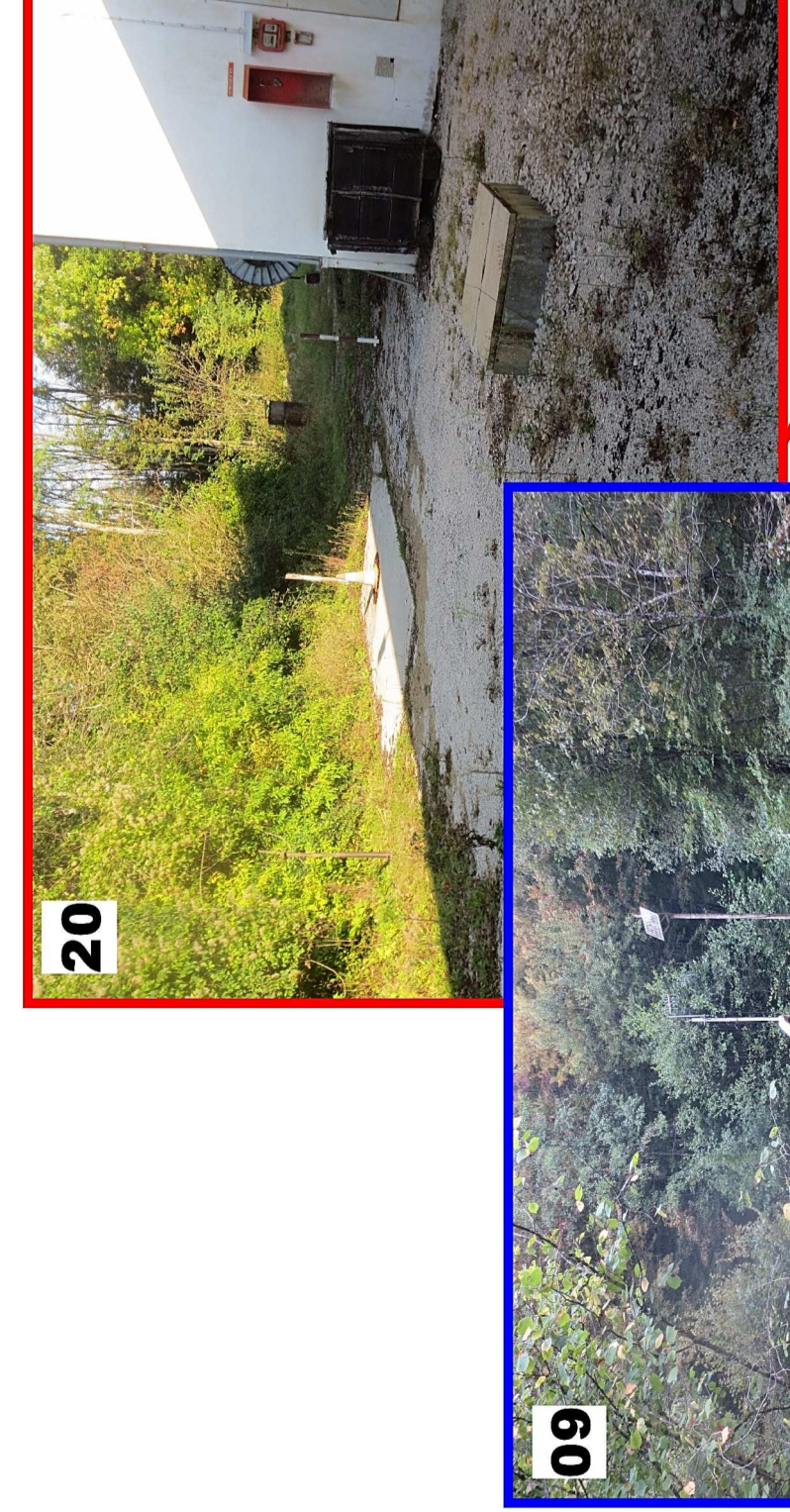
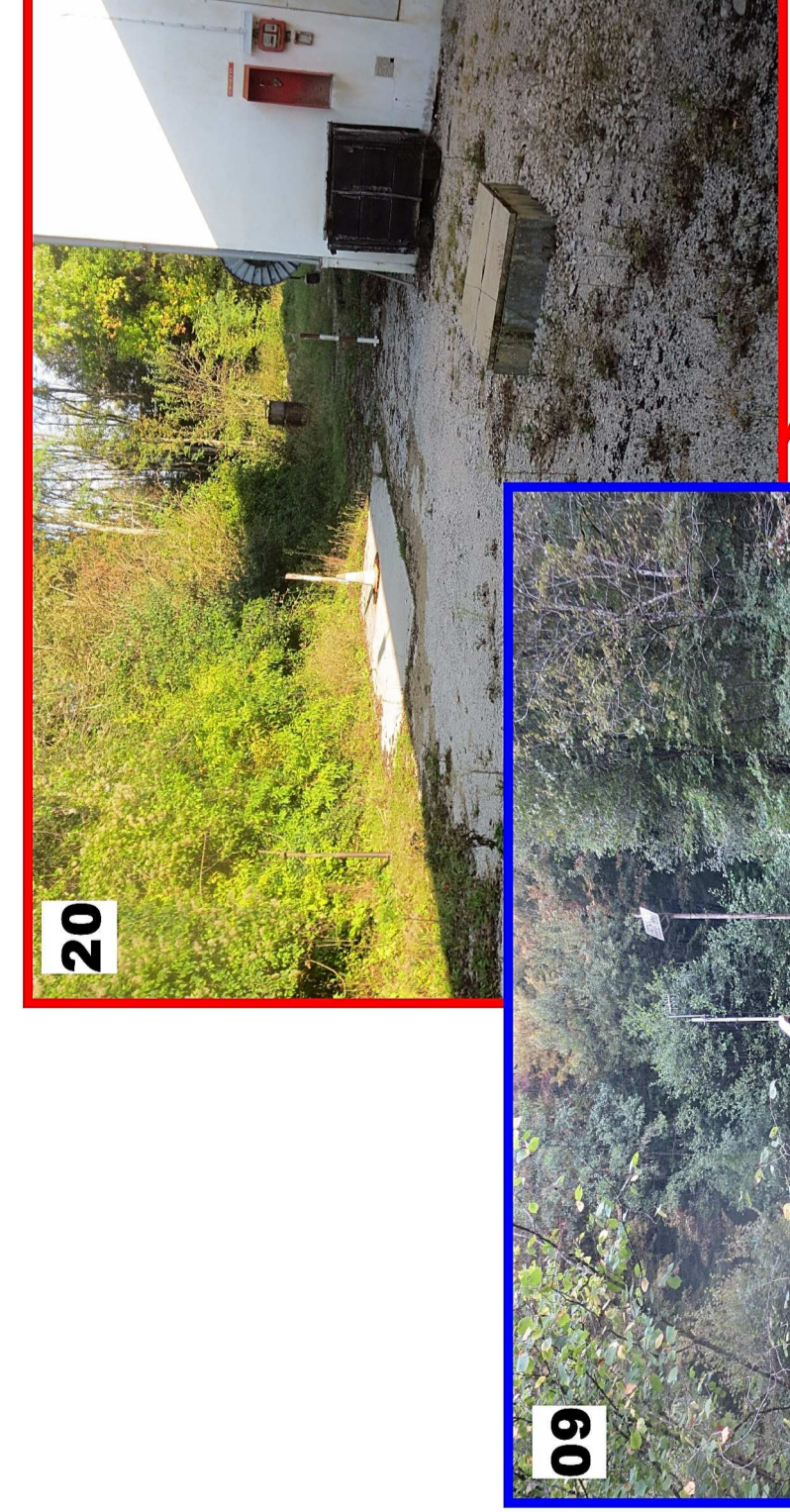
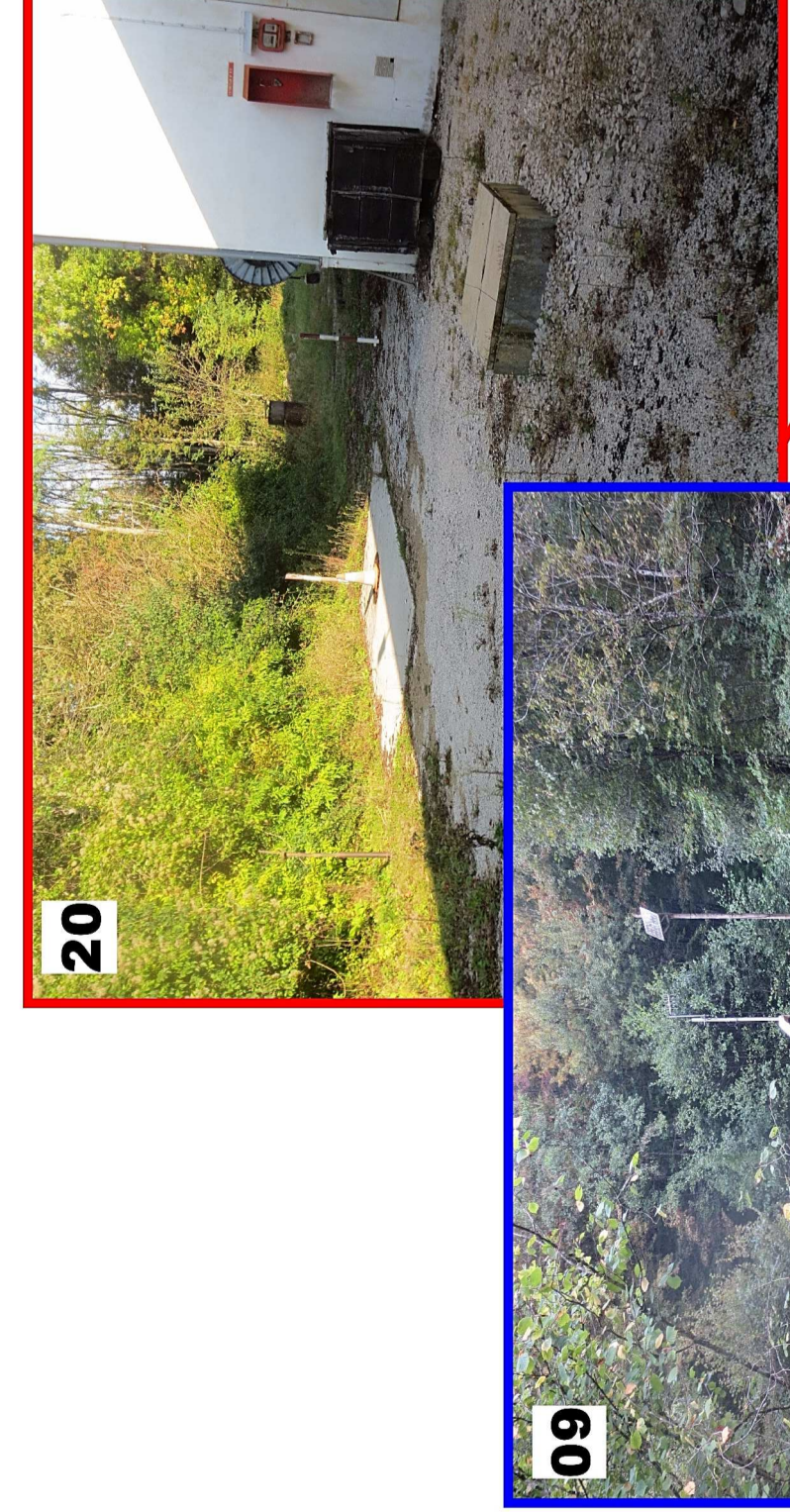
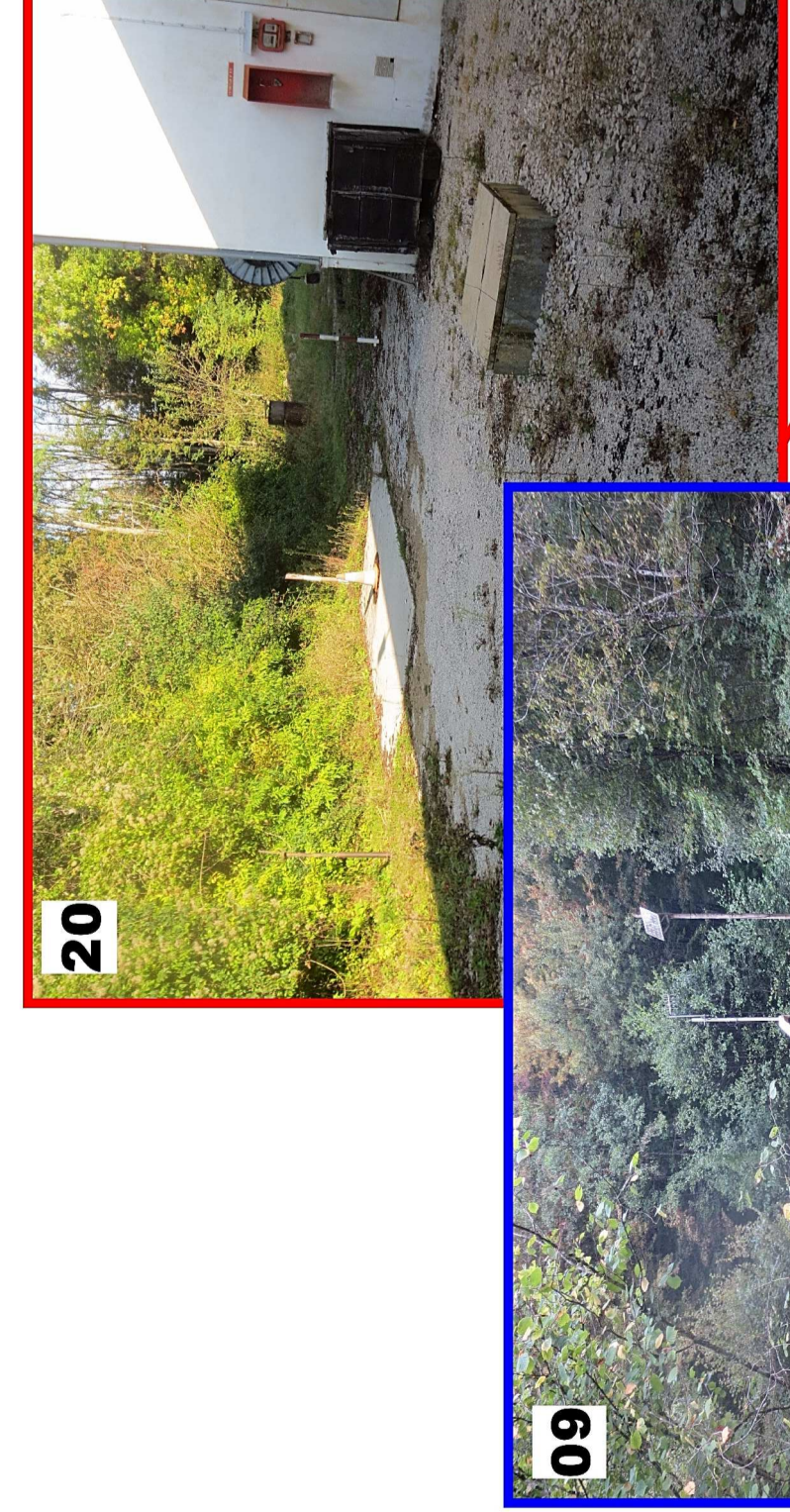
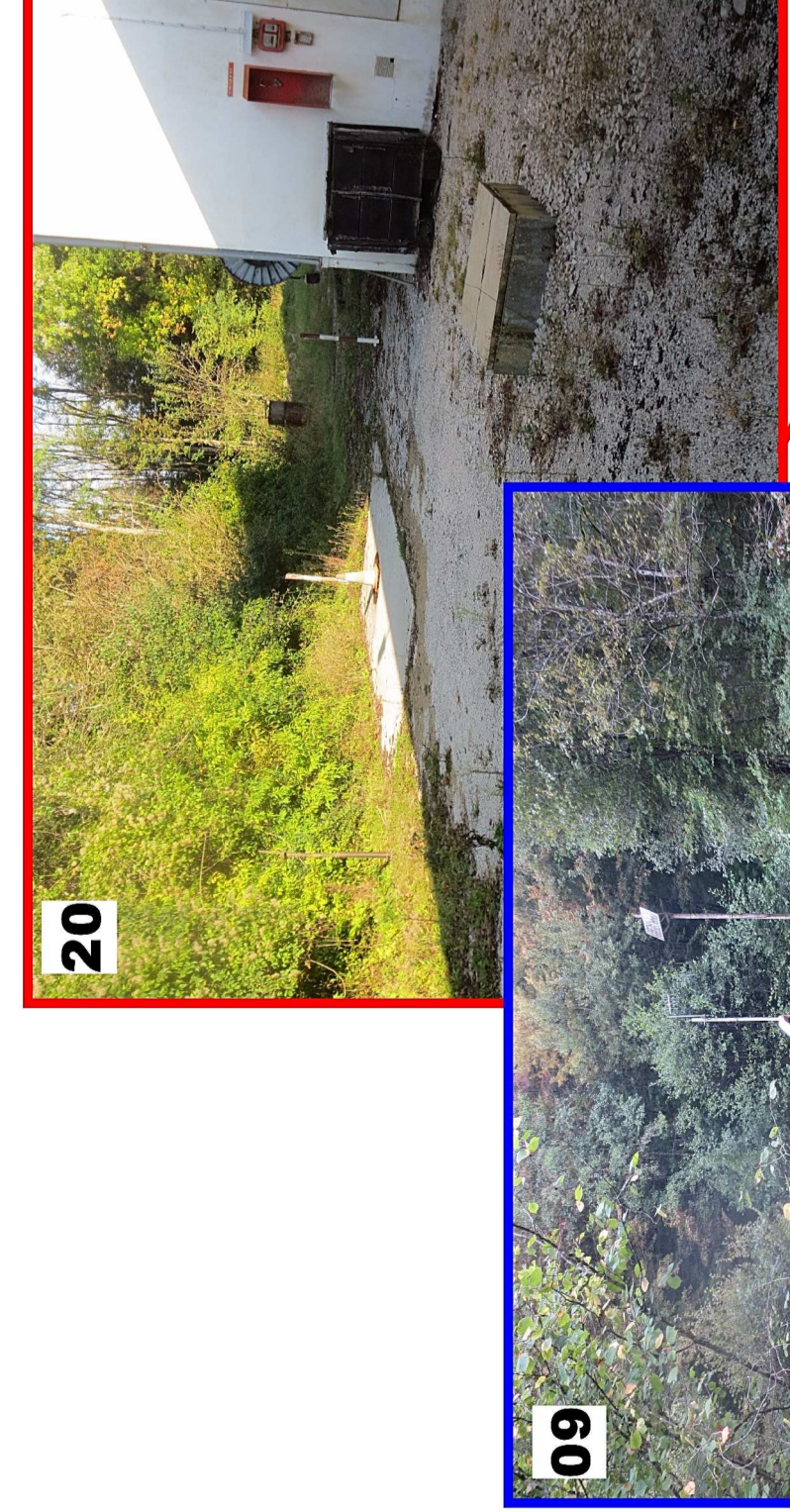
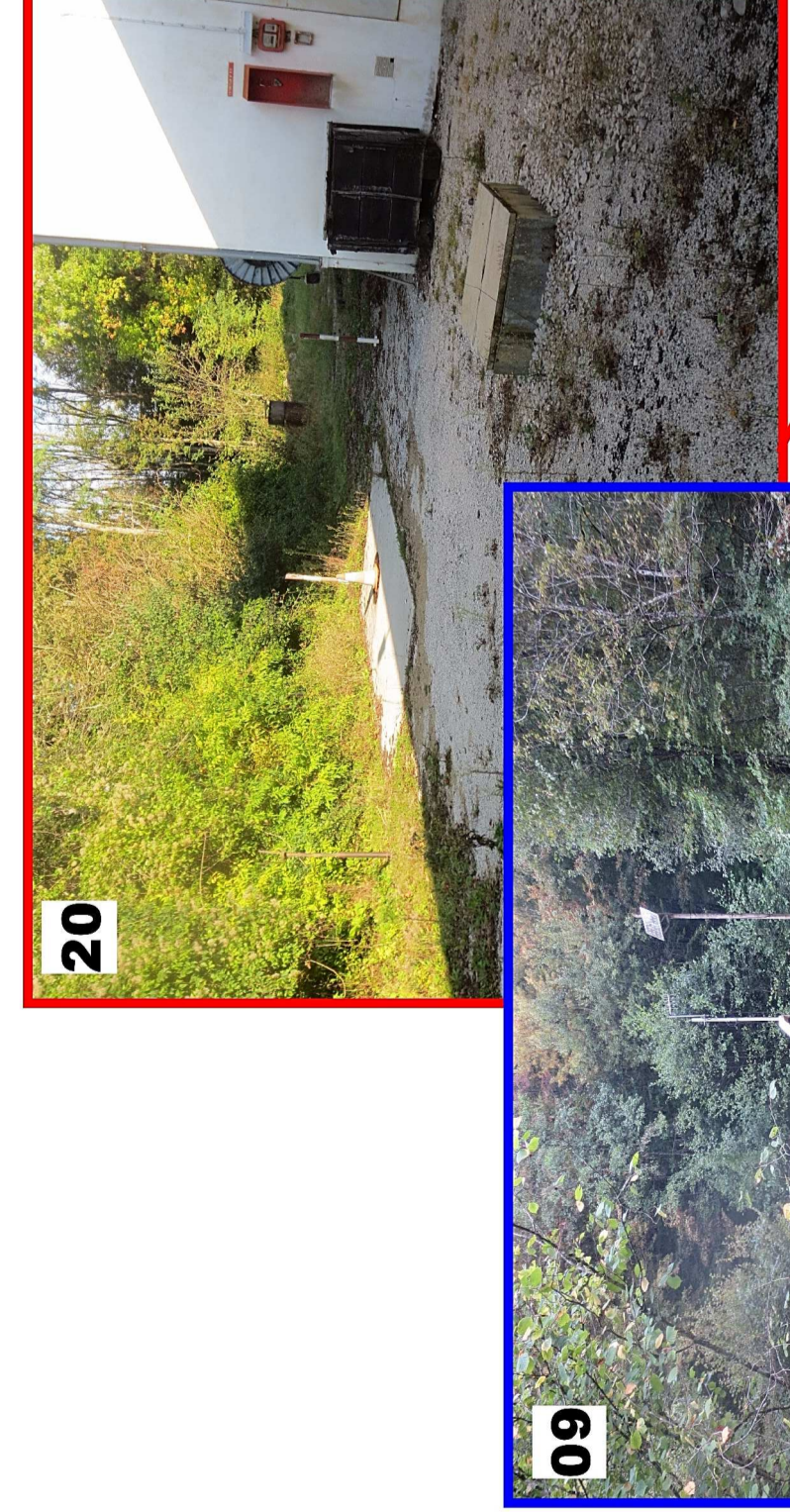
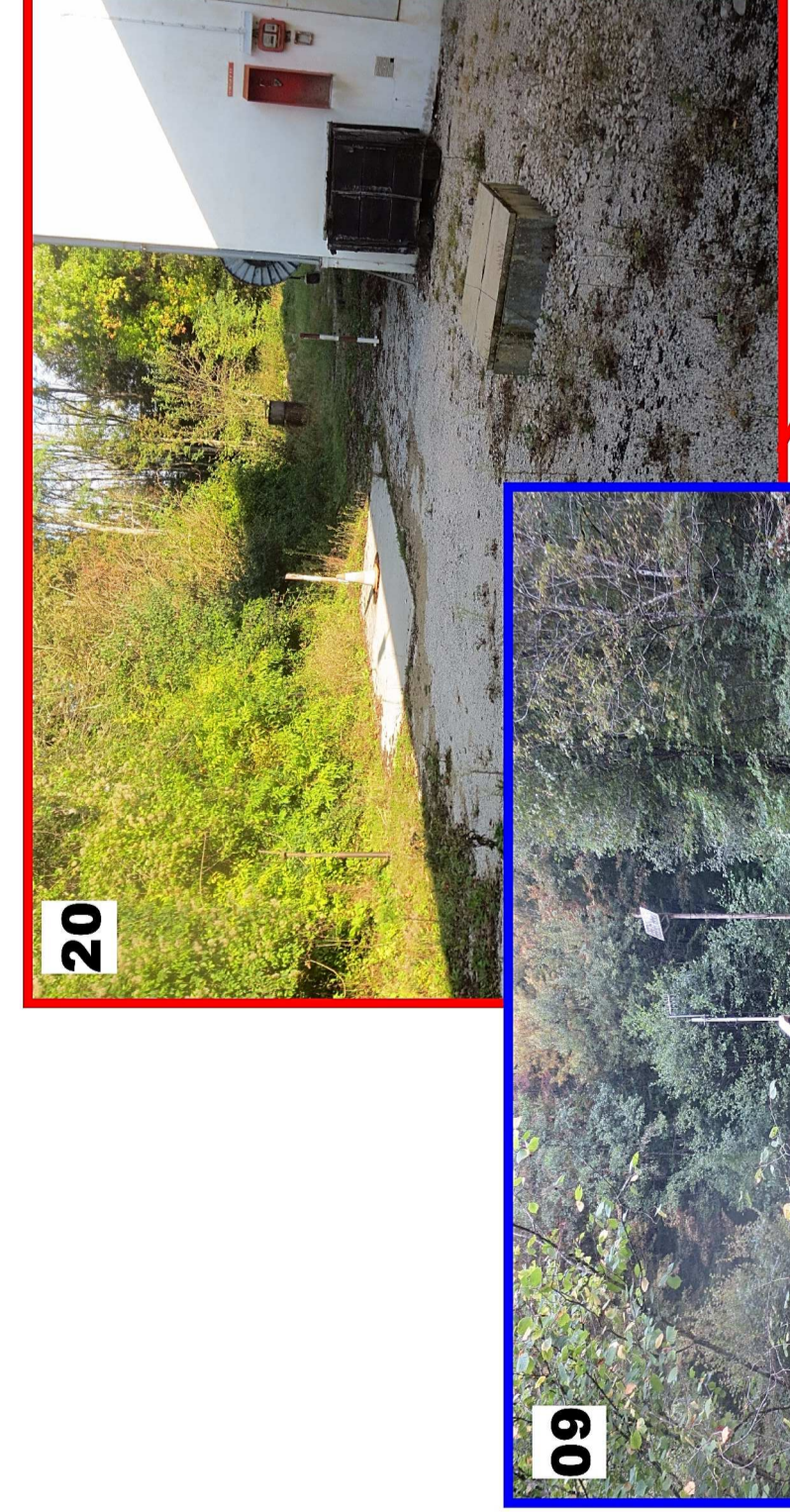
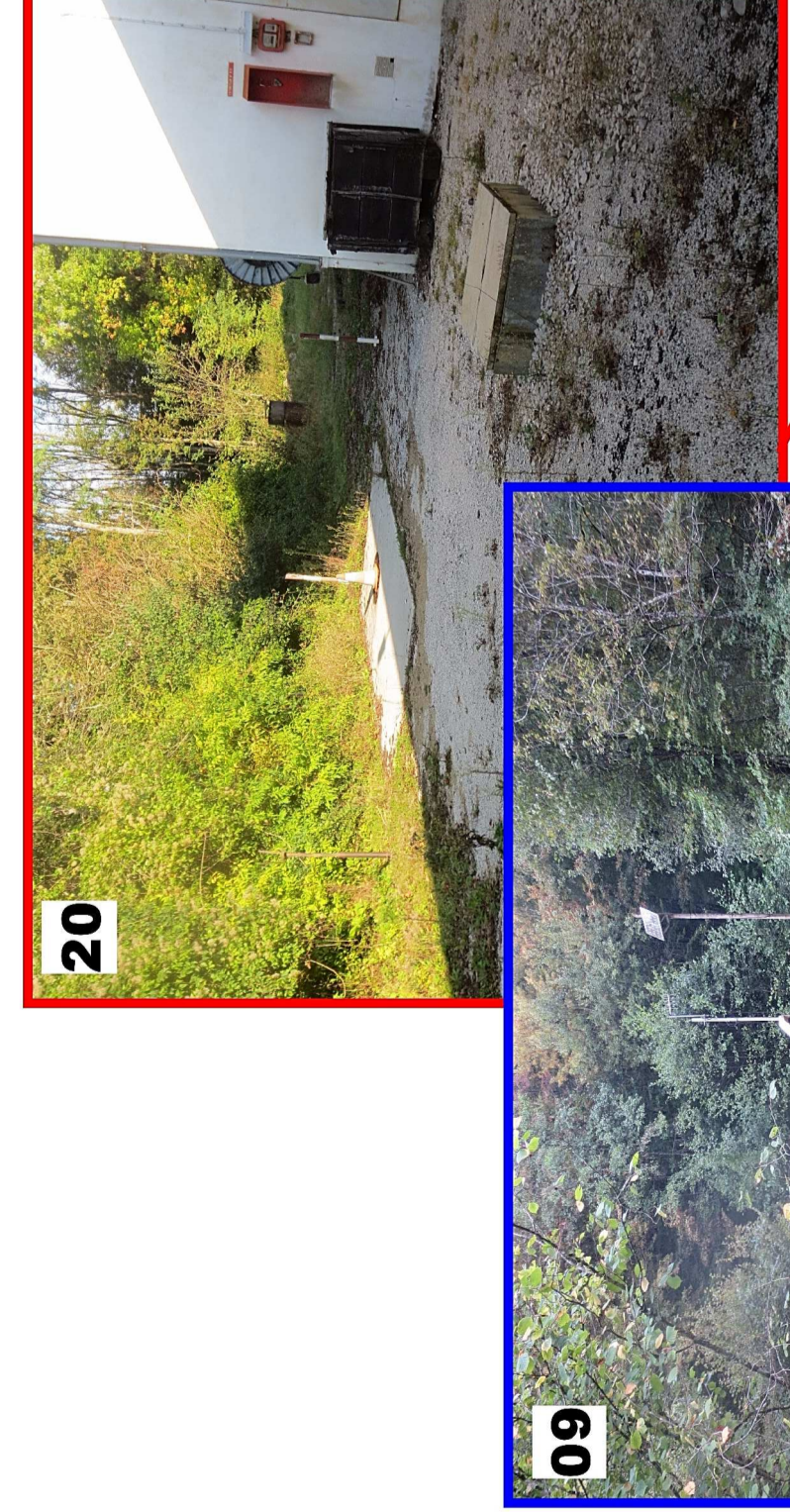
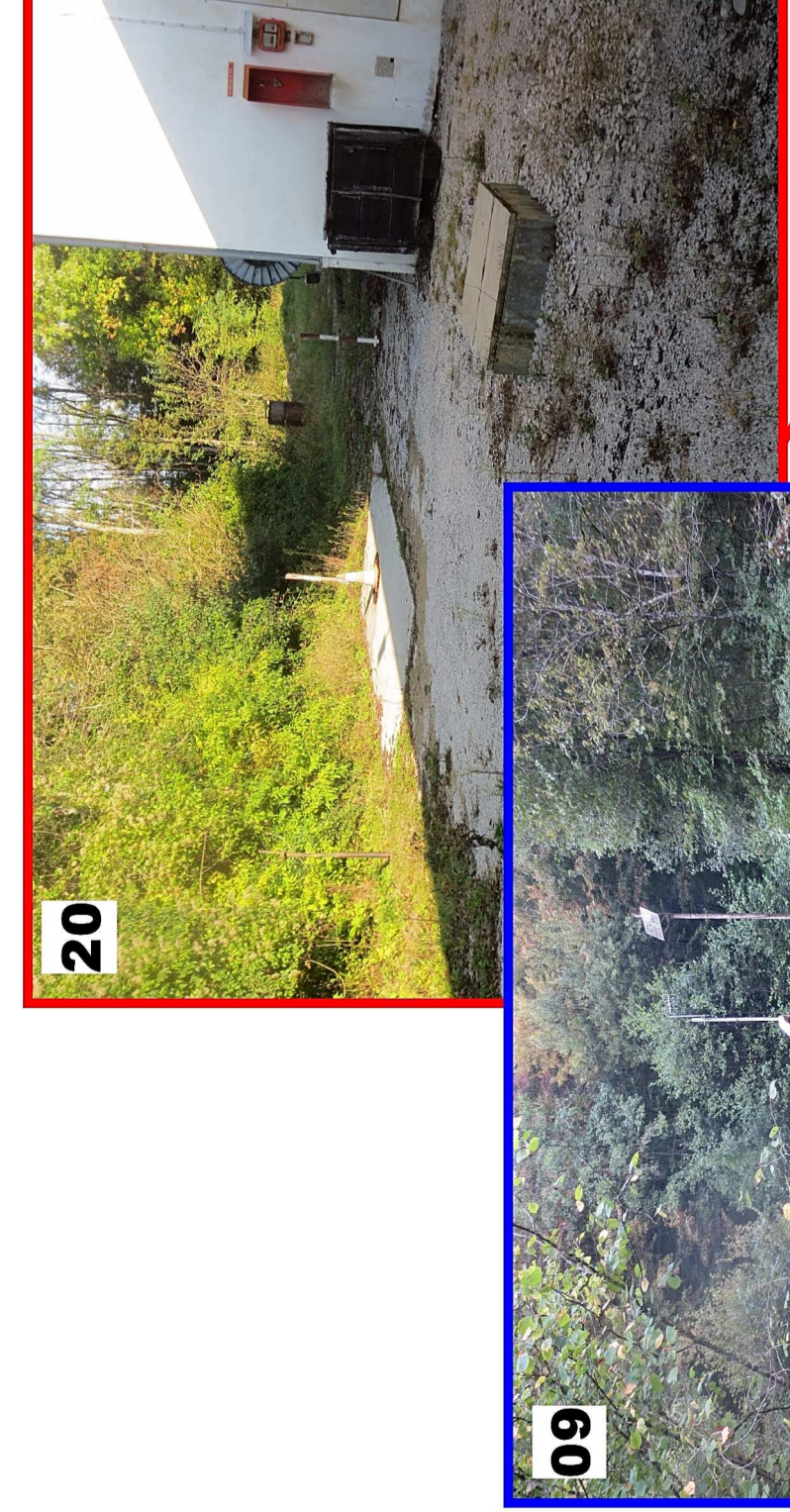
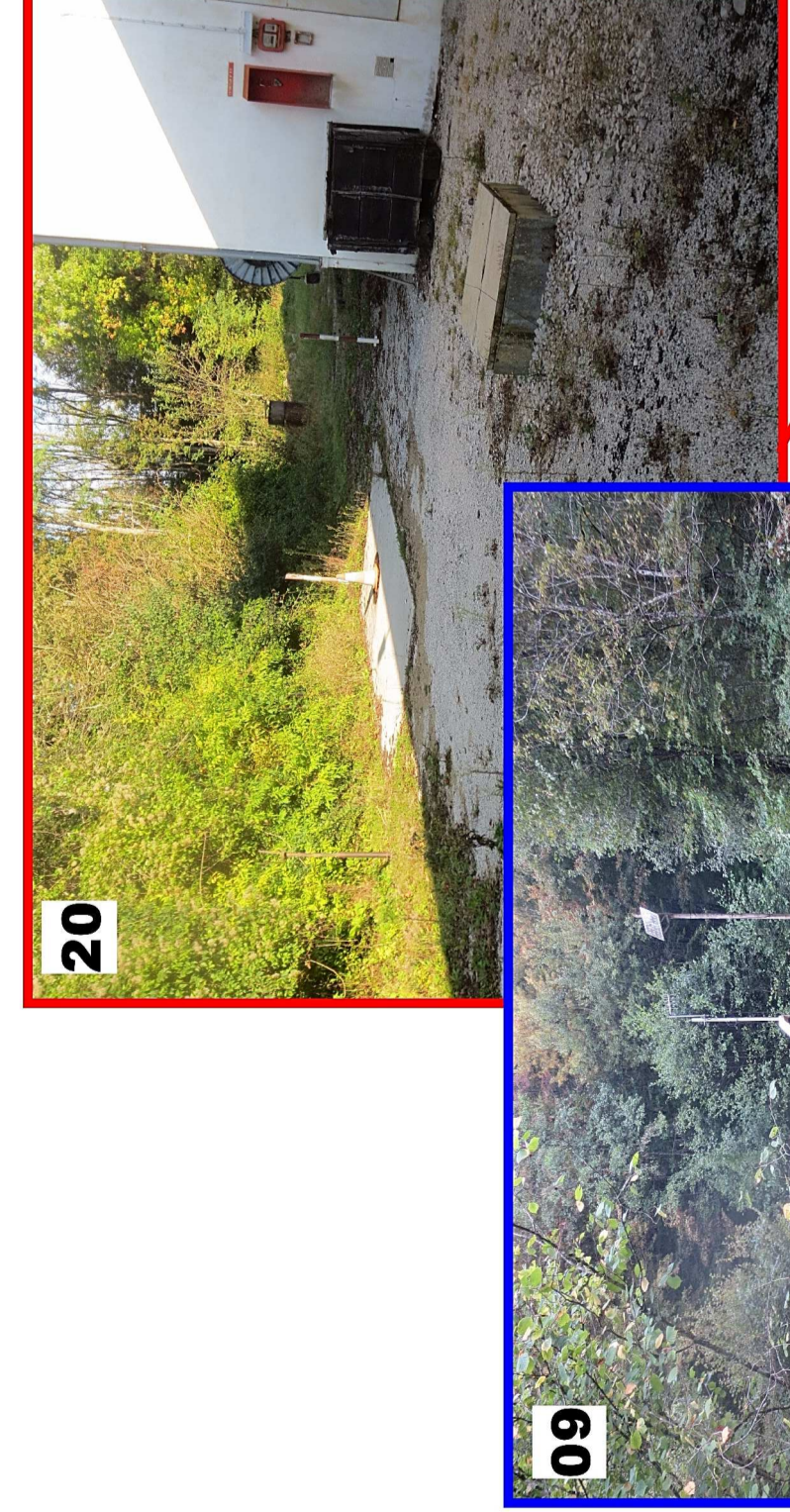
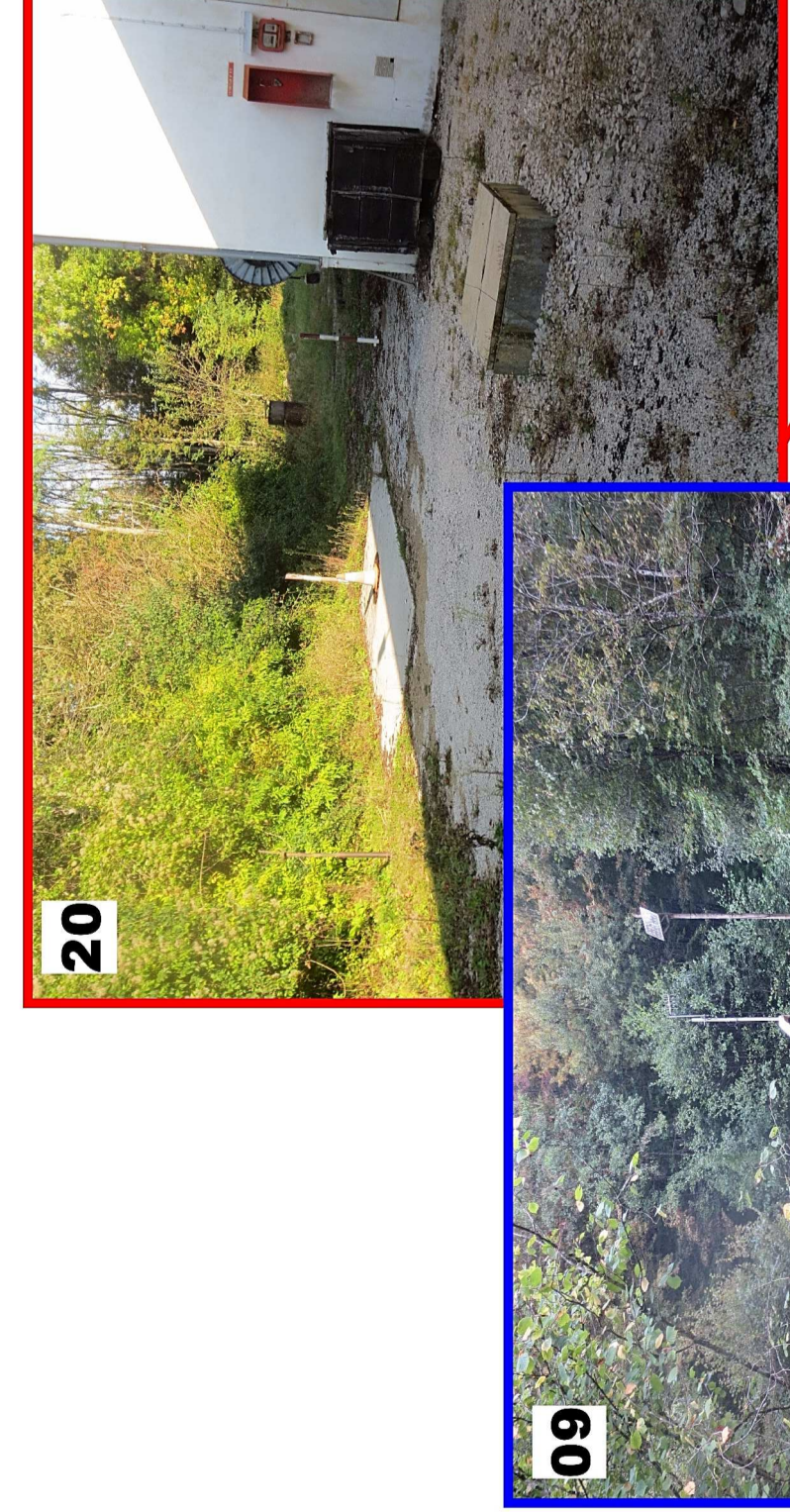
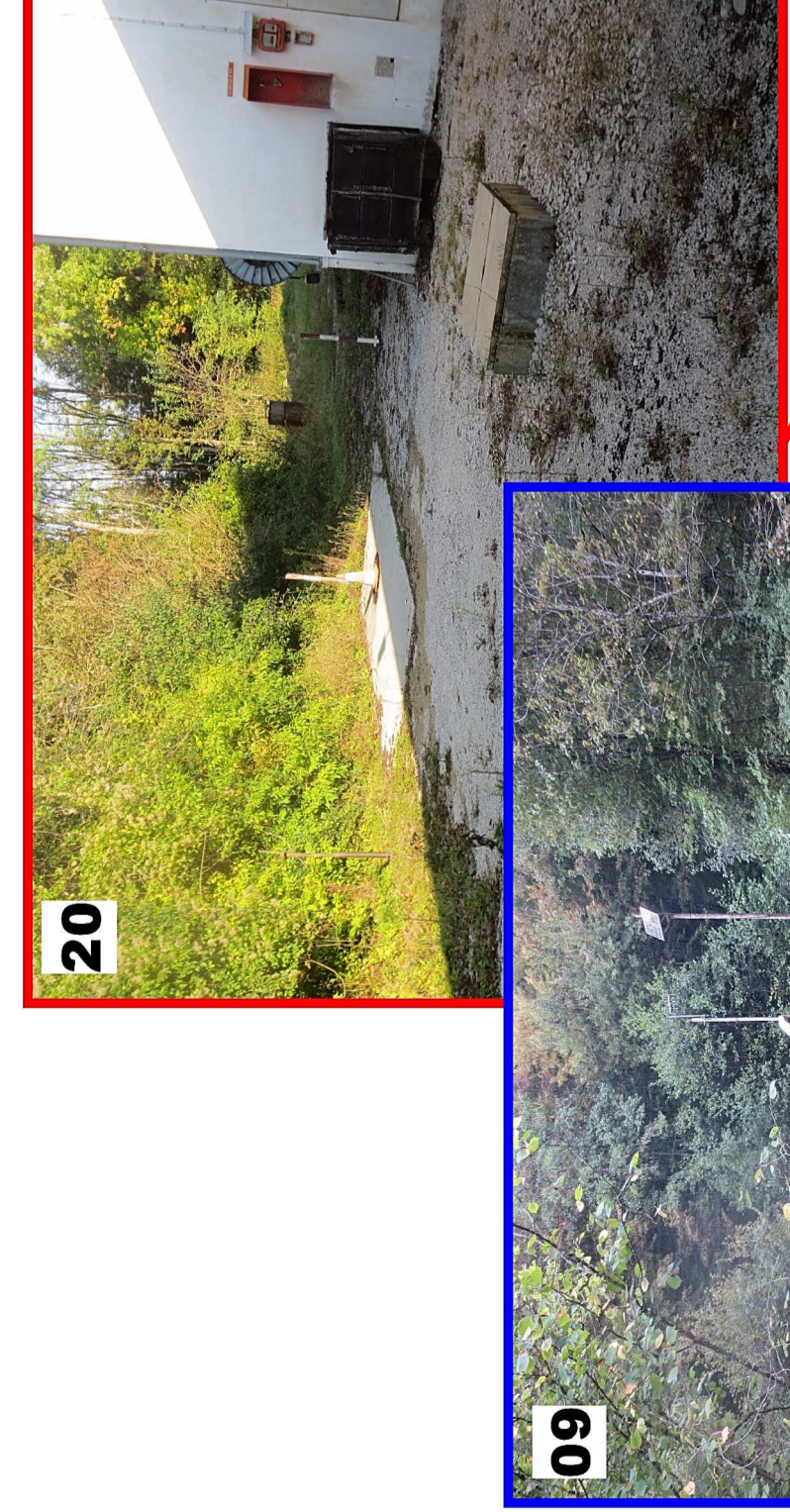
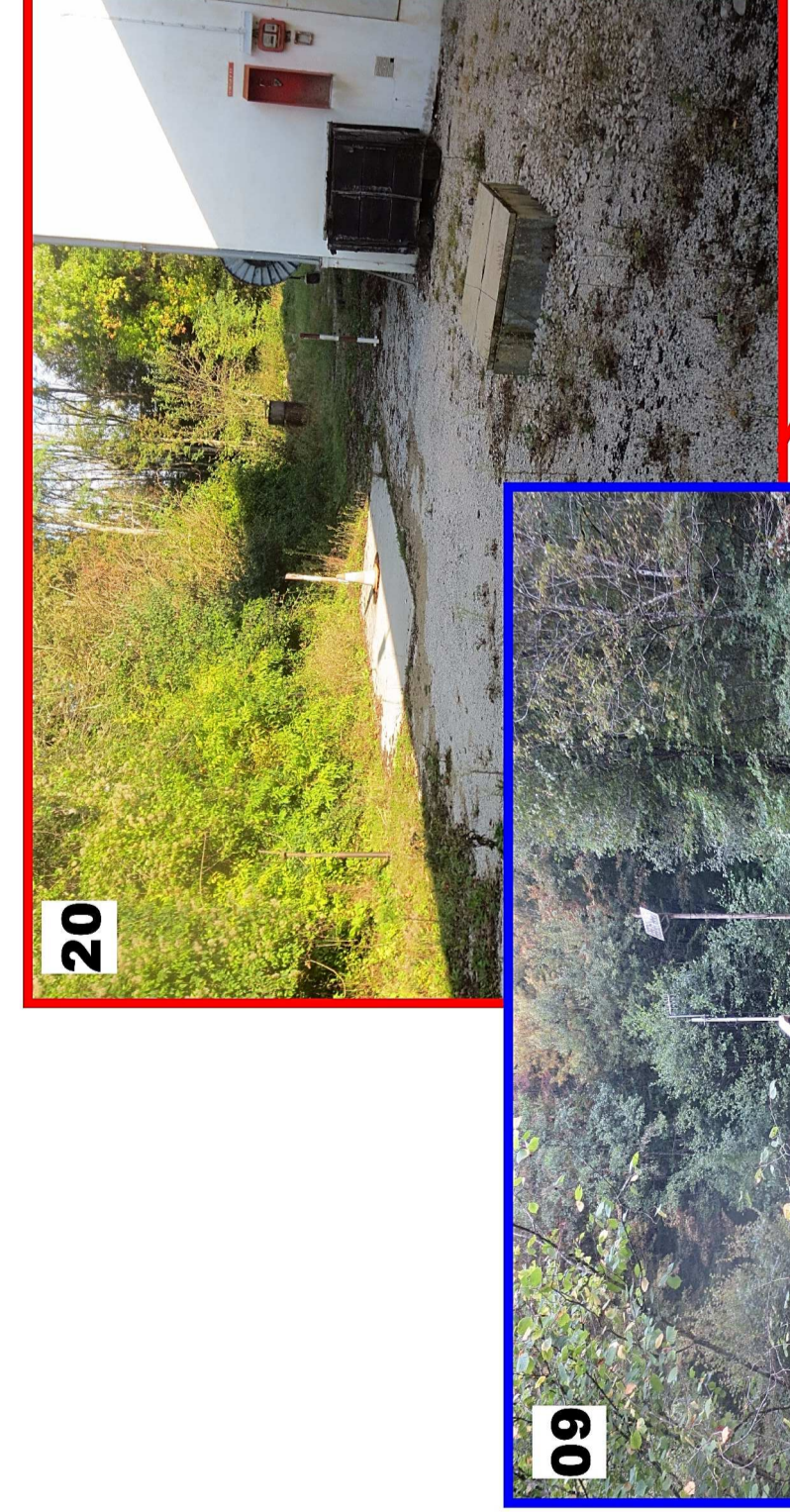
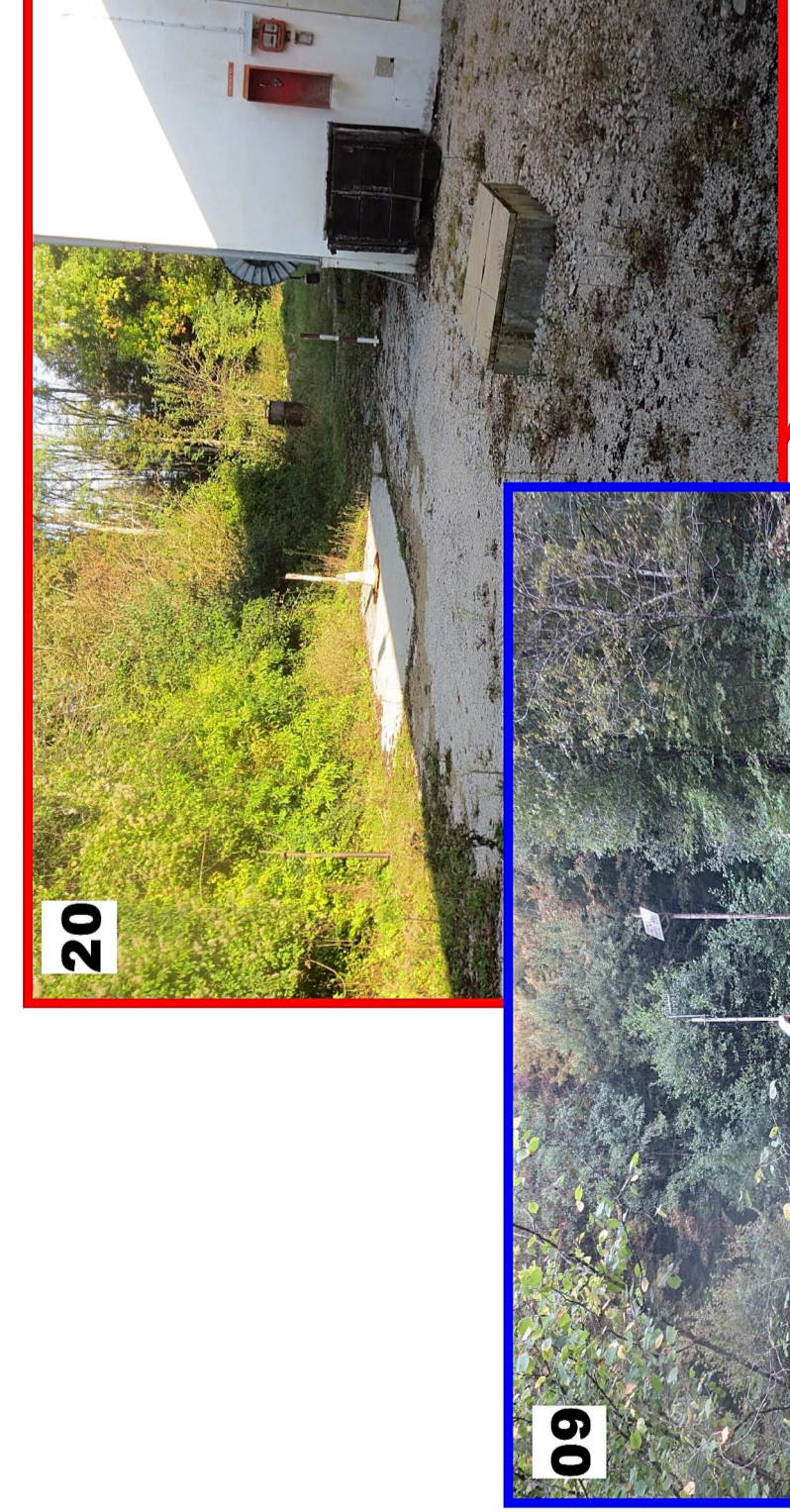
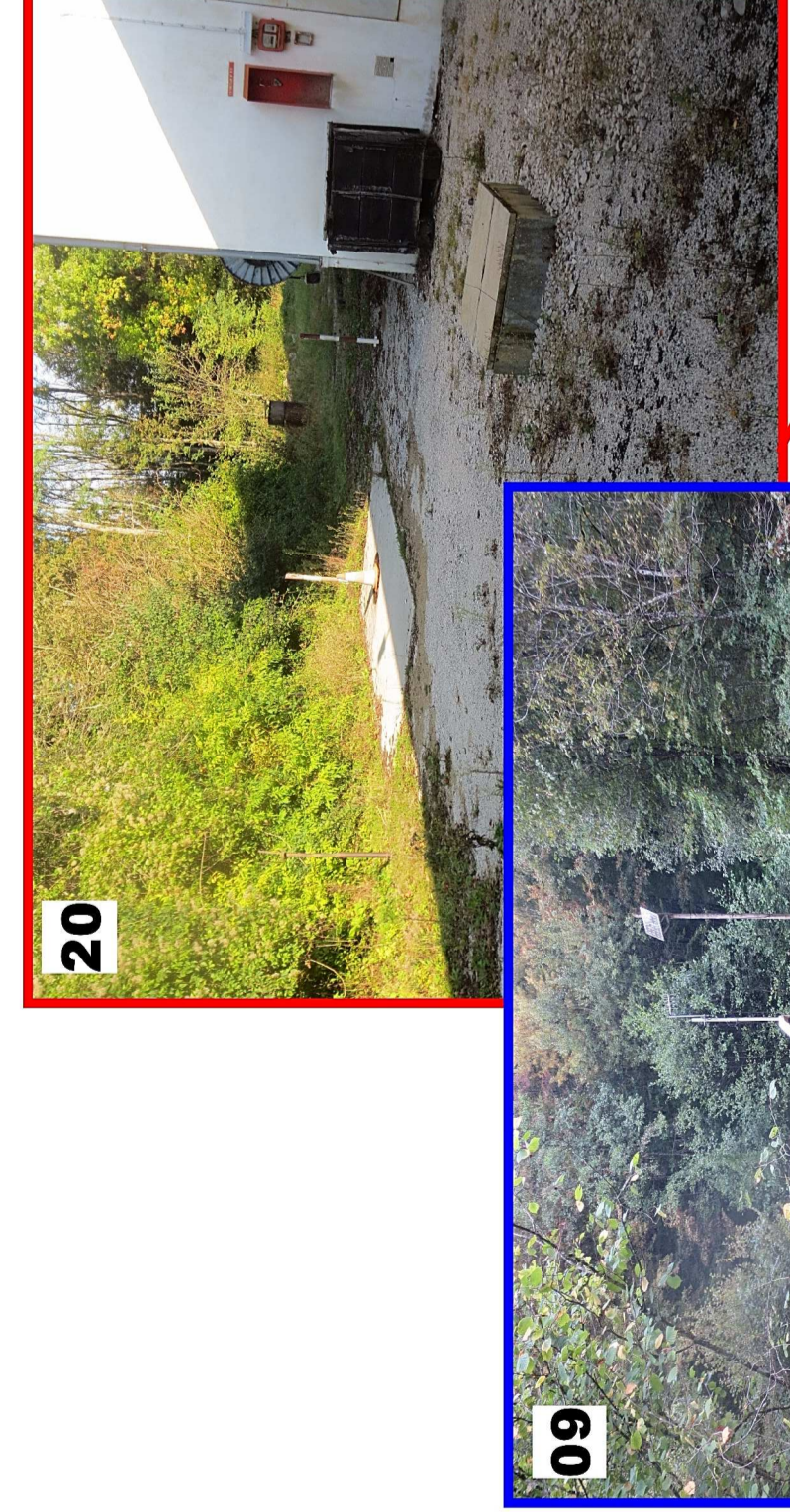
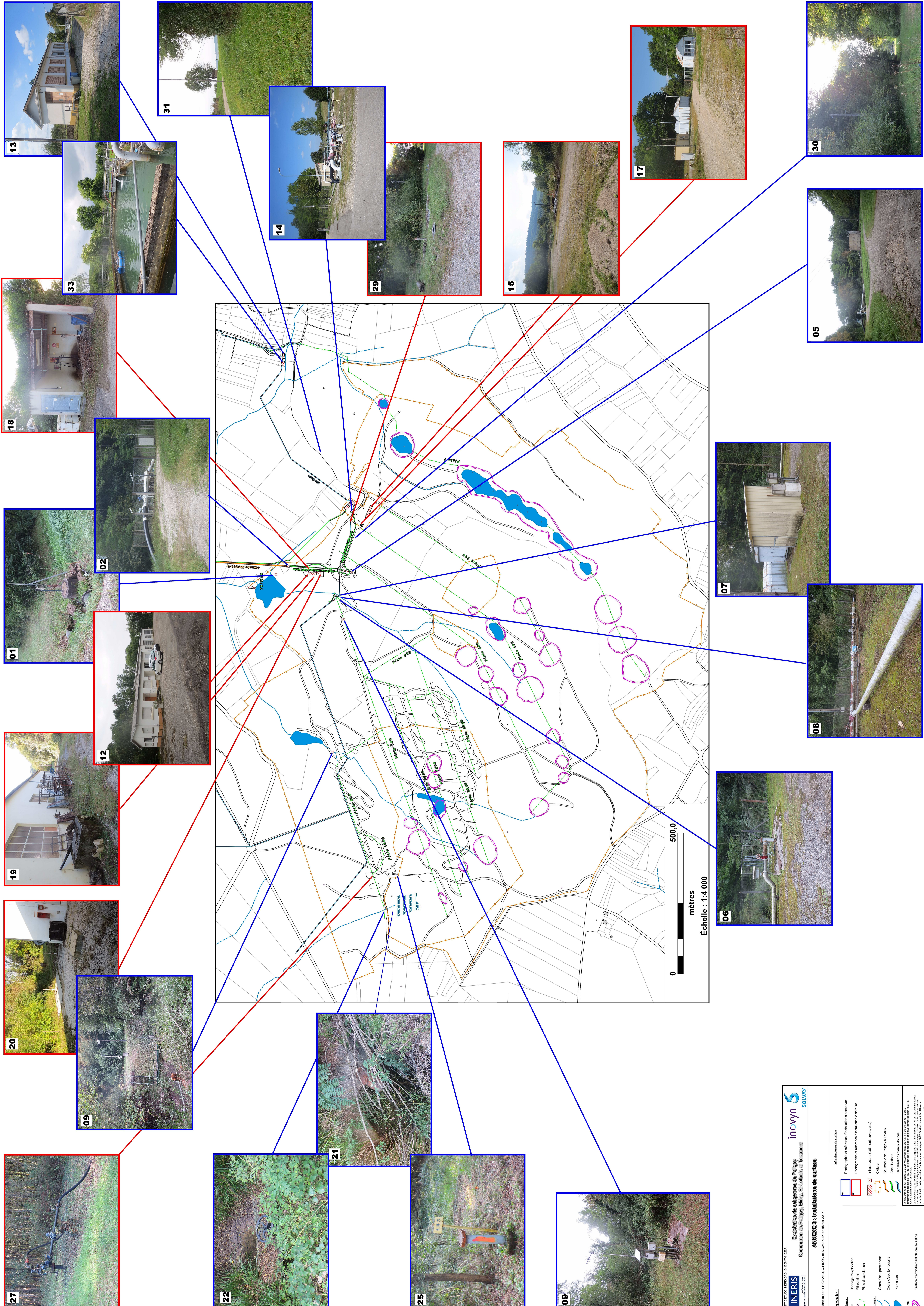
Piste 3500

Coupe de la piste 3500
Sondages



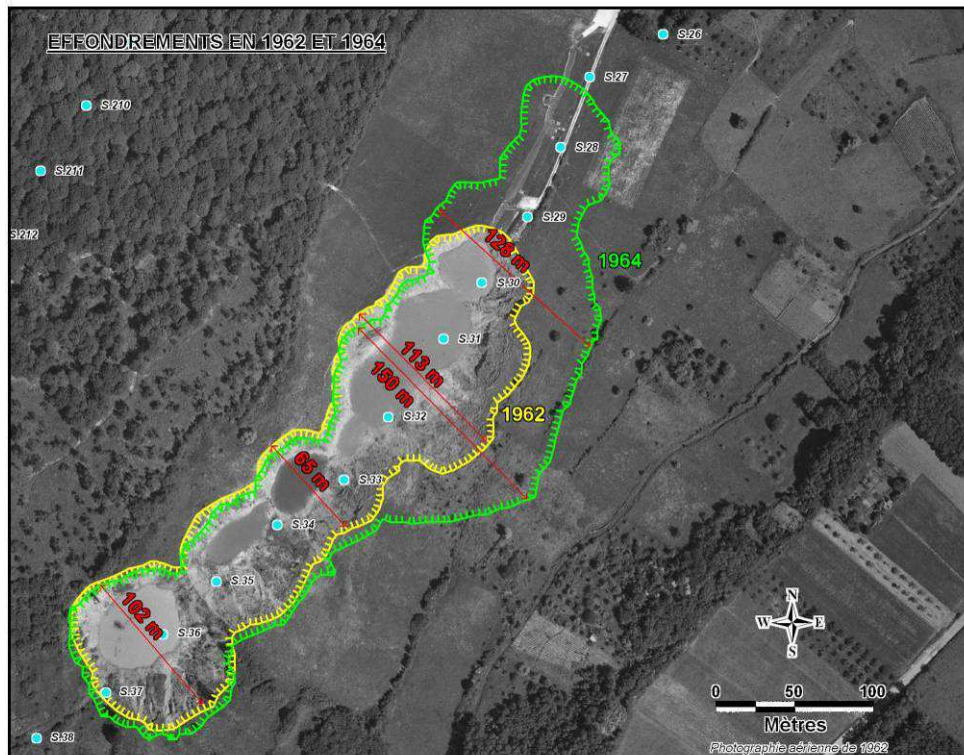
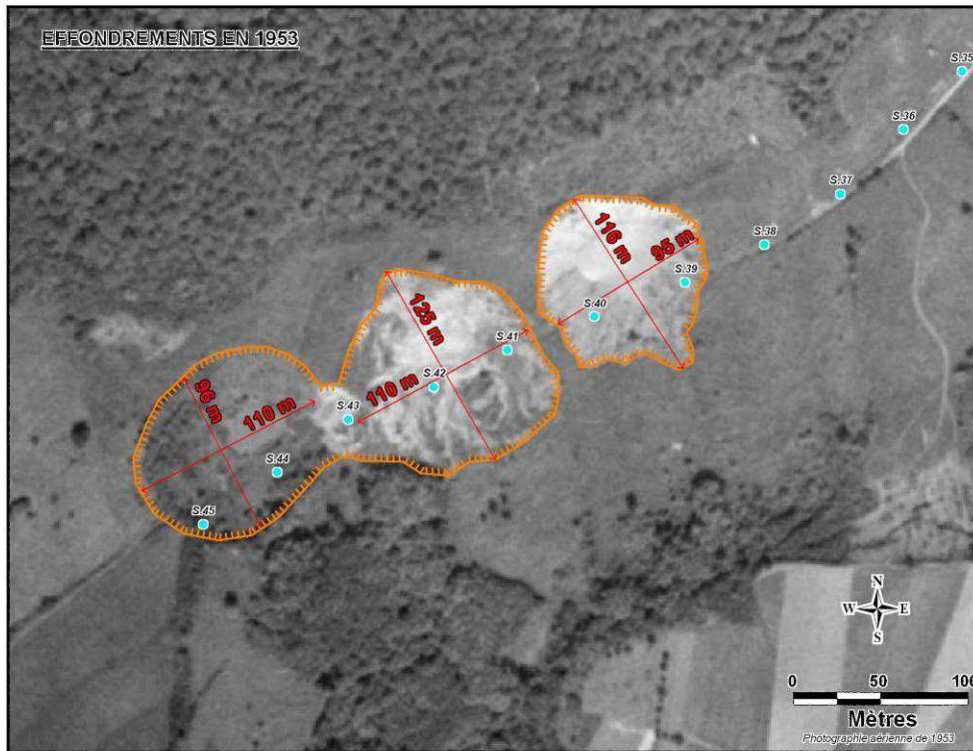


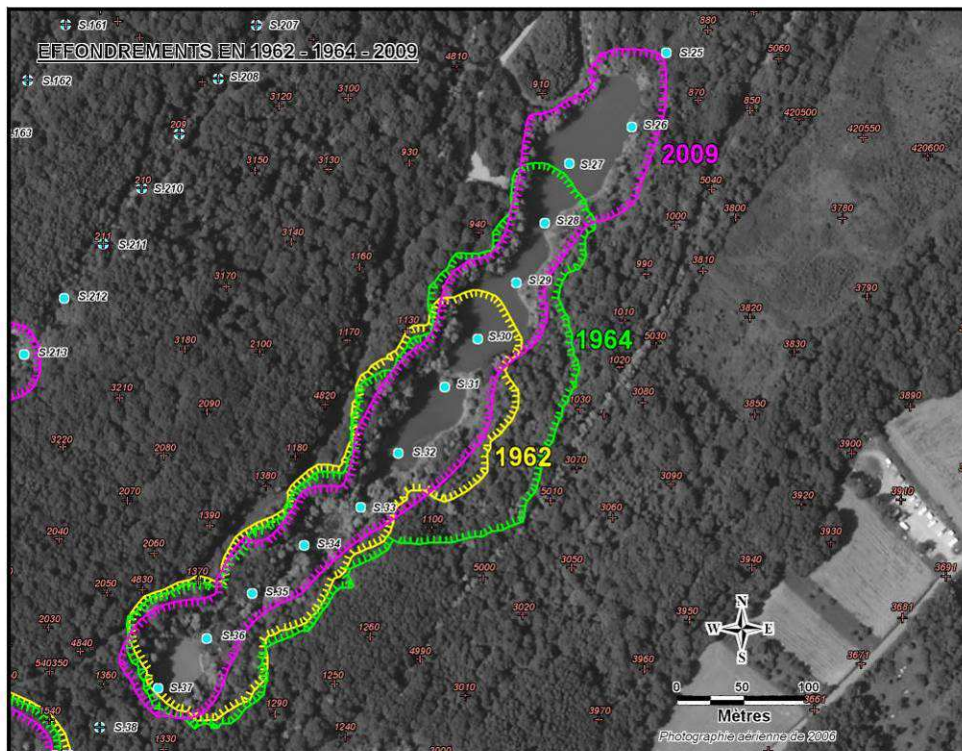
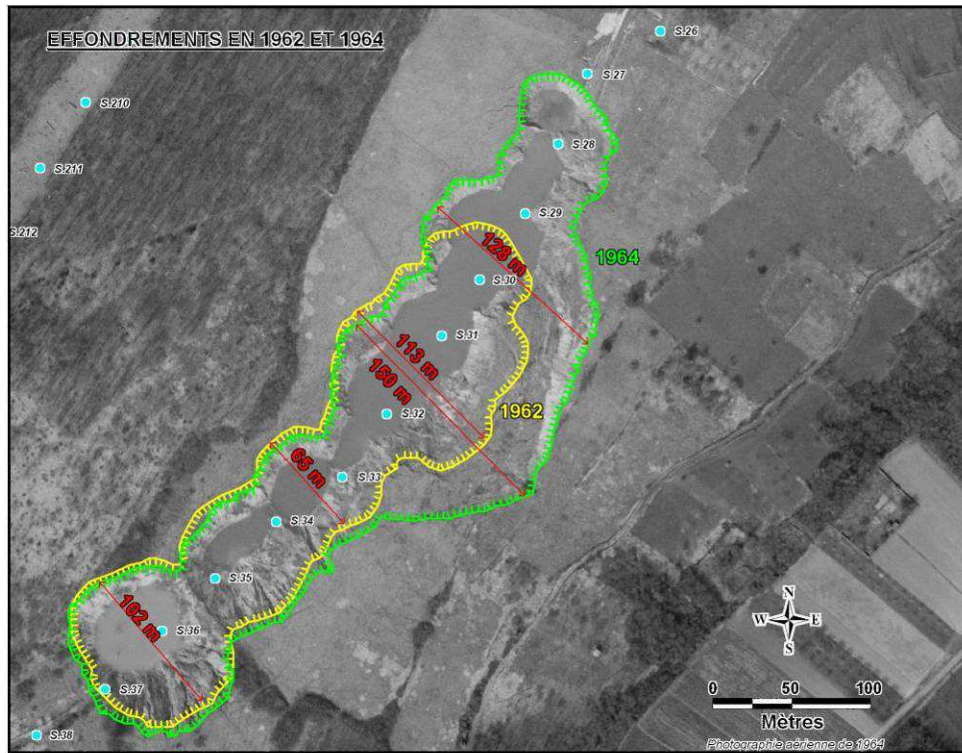
ANNEXE 3 : INSTALLATIONS DE SURFACE

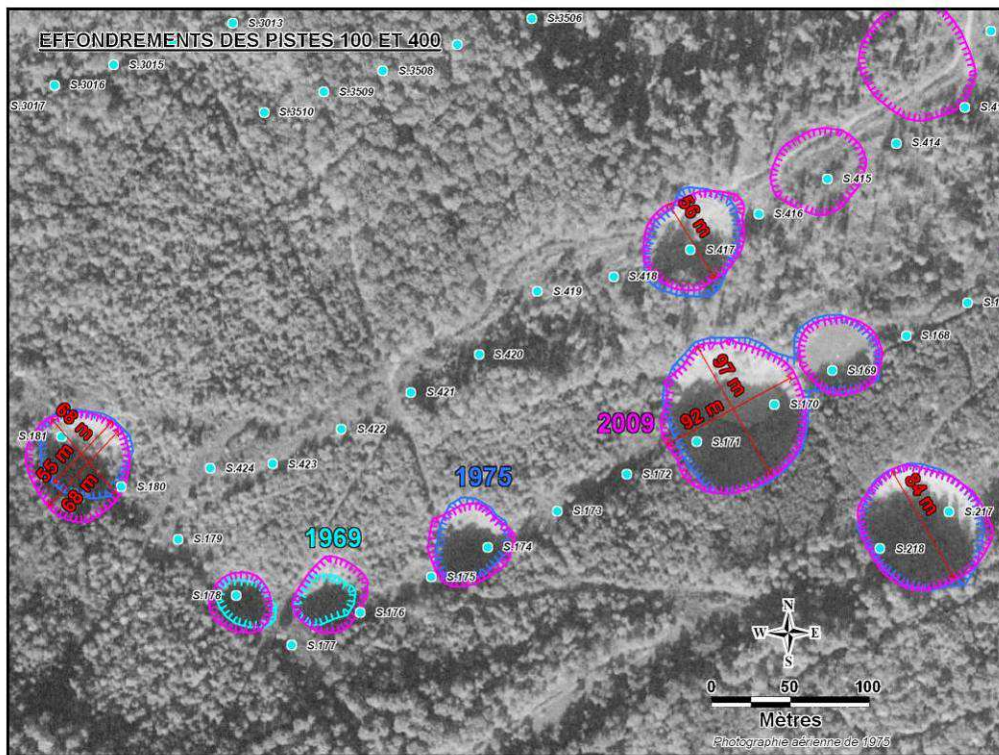
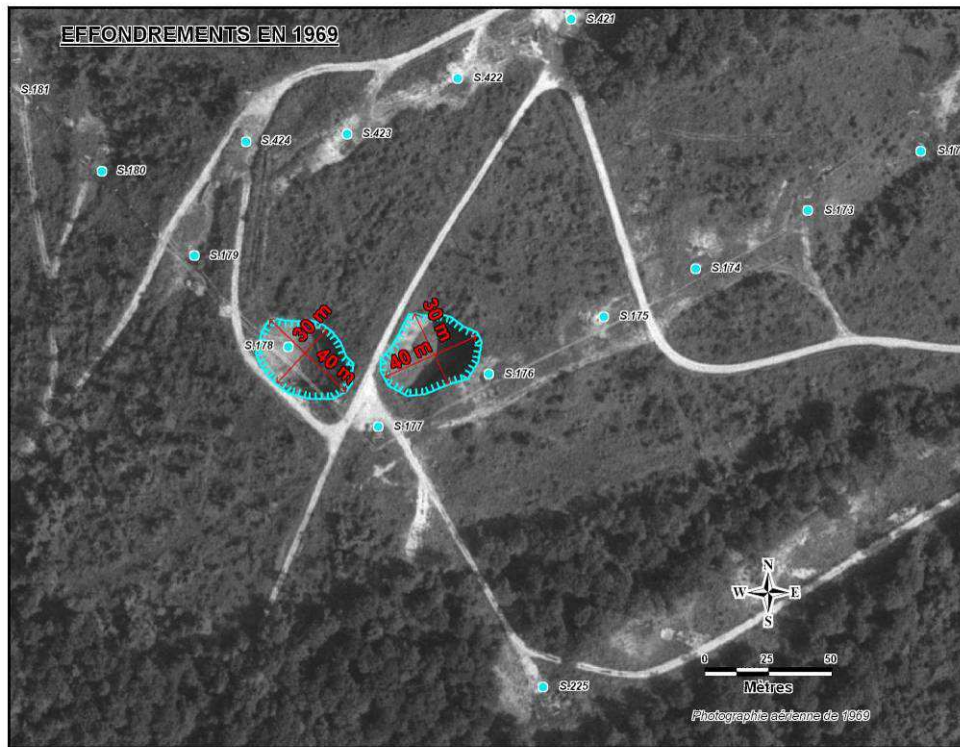


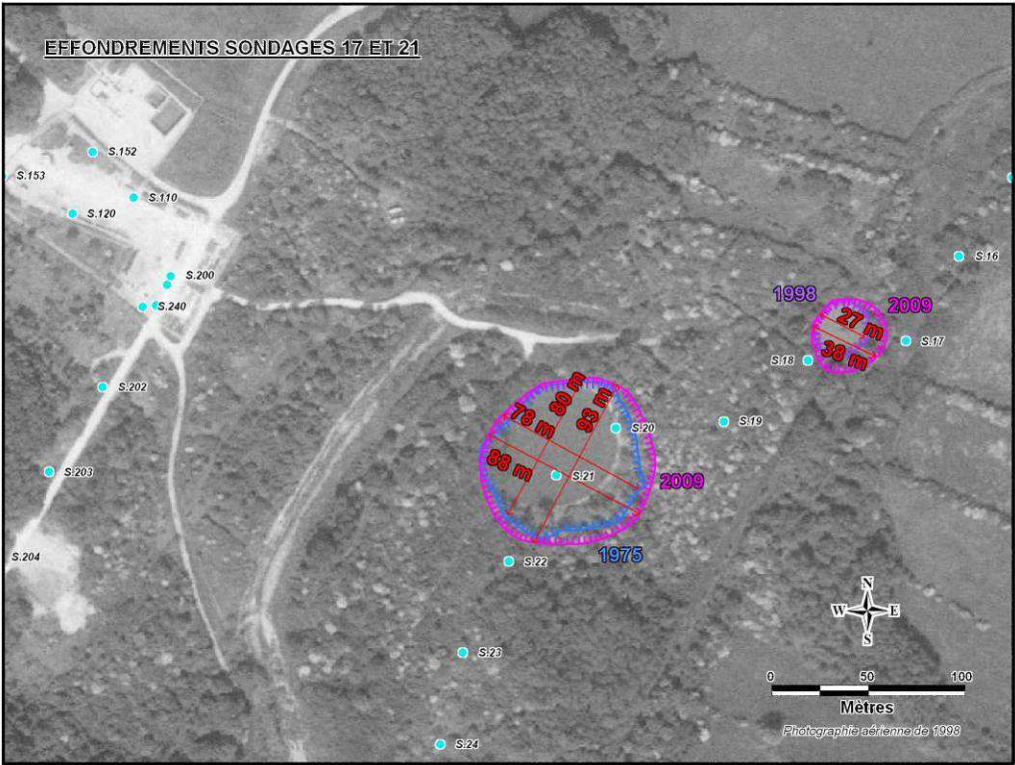
ANNEXE 4 : CARACTÉRISTIQUES DES EFFONDREMENTS

ID	Nom	date d'effondrement	cote du fond (m NGF)	présence d'eau au fond du cratère (0/1/2)*	remarques
C.S.17-18	Cratère S.17-18	< 2002 ?		2	
C.S.21	Cratère S.21	>1974		2	
C.S.27-26-28	Cratère S.27-26-28	15/02/1965	306,2	2	le cratère fait partie d'un cratère allongé multicratères, en lobes. Battement annuel de plusieurs mètres (>2m)
C.S30-29	Cratère S.30-29	08/03/1962		2	le cratère fait partie d'un cratère allongé multicratères, en lobes. Battement annuel de plusieurs mètres (>2m)
C.S32-31	Cratère S.32-31	19/09/1960		2	le cratère fait partie d'un cratère allongé multicratères, en lobes. Battement annuel de plusieurs mètres (>2m)
C.S33	Cratère S.33	30/10/1959	307,8	0	le cratère fait partie d'un cratère allongé multicratères, en lobes.
C.S34	Cratère S.34	25/11/1958		2	le cratère fait partie d'un cratère allongé multicratères, en lobes.
C.S35	Cratère S.35	janv.-58	308,5	1	le cratère fait partie d'un cratère allongé multicratères, en lobes.
C.S.36-37	Cratère S.36-37	janv-57		2	le cratère fait partie d'un cratère allongé multicratères, en lobes.
C.S.40-39	Cratère S.40-39	12/10/1950		1	
C.S.42	Cratère S.42	21/06/1950		1	
C.S.44	Cratère S.44	27/09/1943		1	
C.S.163	Cratère S.163	#	308,75	0	
C.S.165	Cratère S.165	#		2	
C.S.169	Cratère S.169	22/03/1974	314,5	1	
C.S.170-171	Cratère S.170-171	13/05/1973	311,2	0	
C.S.174	Cratère S.174	02/03/1971	337,65	0	
C.S.176-177	Cratère S.176-177	09/06/1969	342,2	0	
C.S.178	Cratère S.178	07/06/1969		1	
C.S.181	Cratère S.181	05/08/1969		1	
C.S.213	Cratère S.213	#		0	
C.S.216	Cratère S.216	#	334,65	0	
C.S.217	Cratère S.217	01/03/1974	325	0	
C.S.413	Cratère S.413	#		1	
C.S.415	Cratère S.415	#	313,3	0	
C.S.417	Cratère S.417	#	322,25	0	
C.S.518	Cratère S. 518	19/01/1999		0	
C.S.519	Cratère S. 519	27/05/1996		1	
C.S.524	Cratère S. 524	17/04/1996		0	une source pseudo-pérenne est présente dans un fossé contigu à son flanc ouest (suintait en période étiage 04/05/2011)
C.S.1508-1509	Cratère S.1509	14/11/2003	323	0	
C.S.1510	Cratère S.1510	22/07/2000		2	
C.S.1512	Cratère S.1512	20/12/1997		2	le cratère fait partie d'un cratère allongé multicratères, en lobes. Un 'grand' plan d'eau s'est formé (cratère a fusionné avec le fossé du ruisseau est. Son exutoire étant bouché.
C.S.1517-1518	Cratère S.1517-1518	17/04/1996		0	
C.S.3019-3020	Cratère S.3019-3020	20/11/1997	329	1	





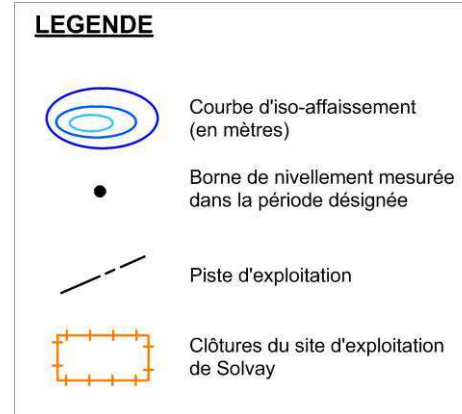
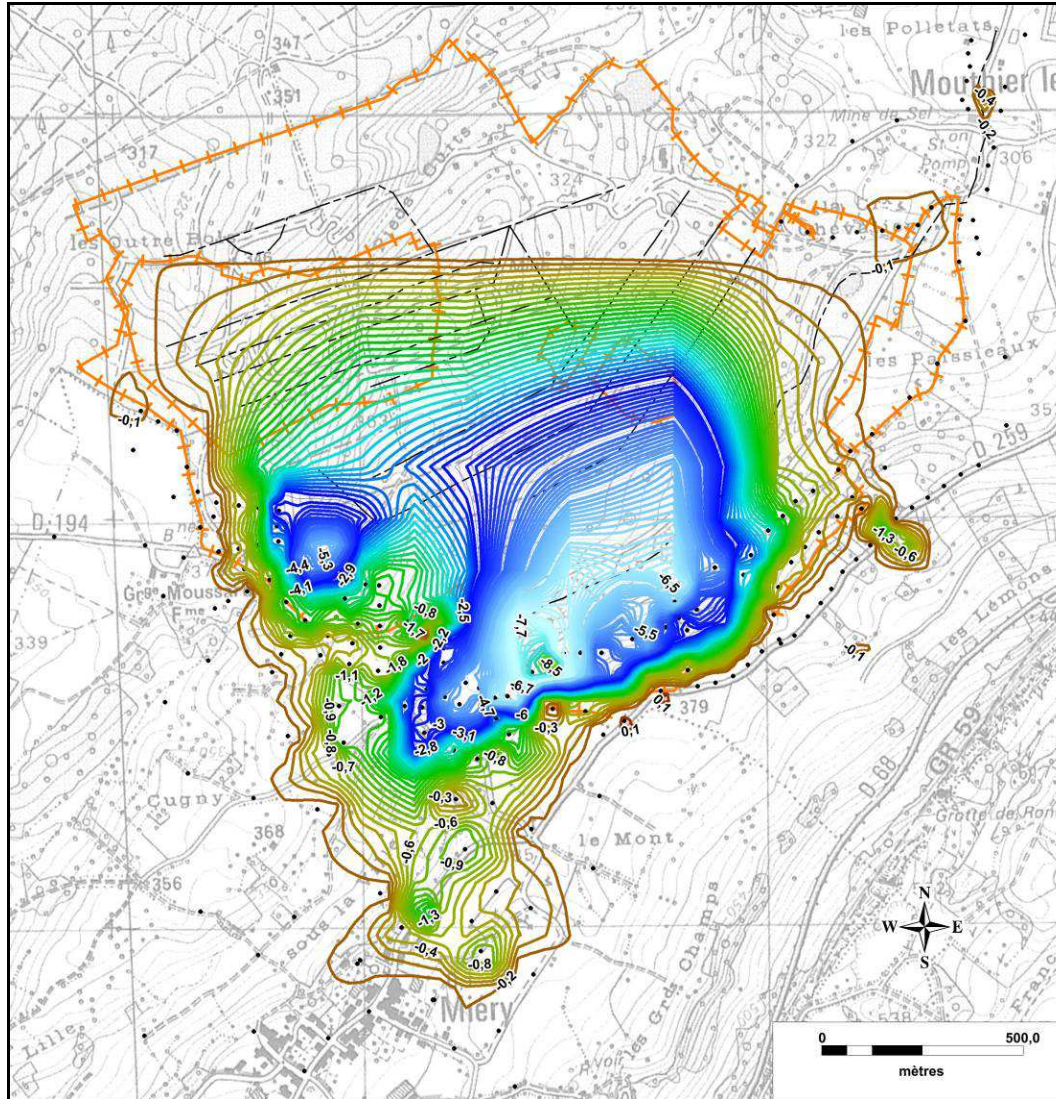




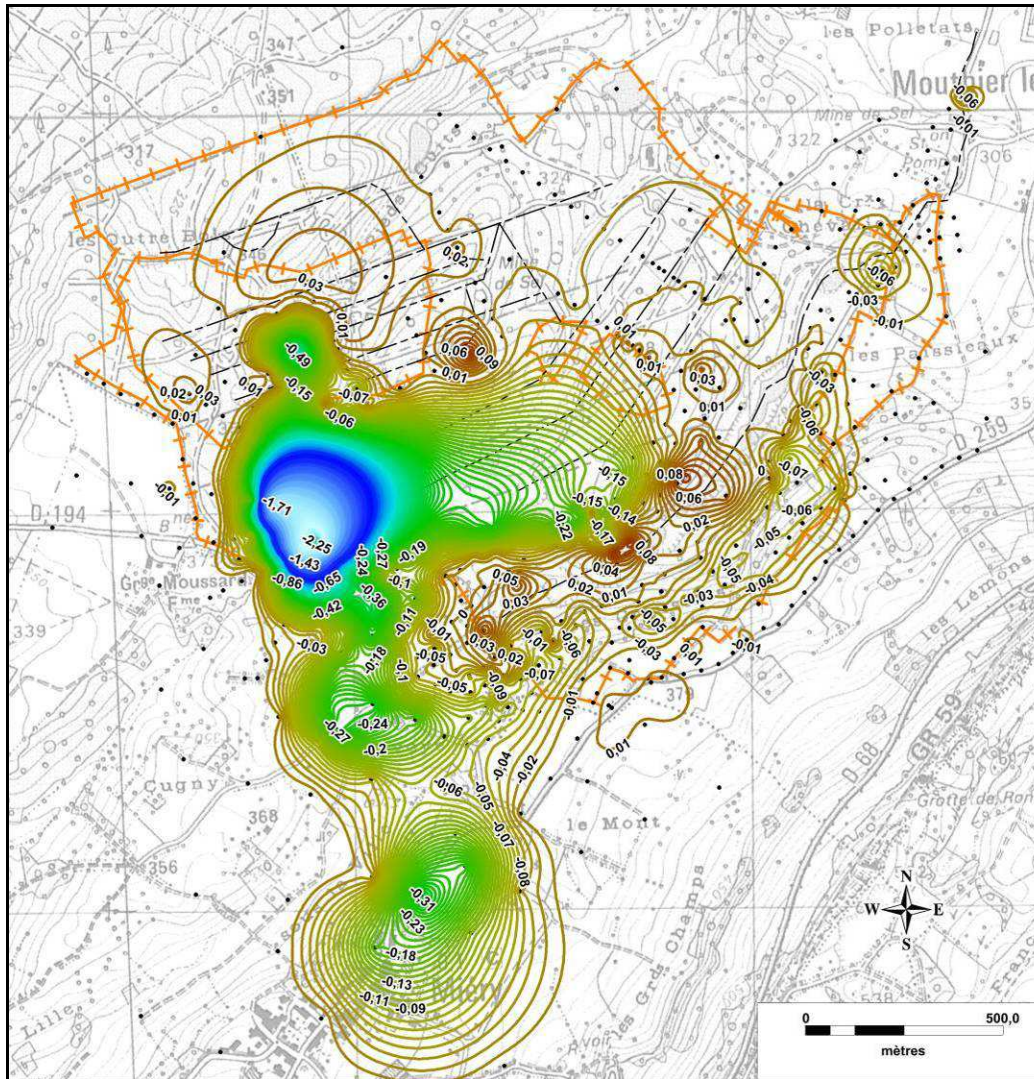
ANNEXE 5 : CARTOGRAPHIES DES AFFAISSEMENTS

- Période 1934-2016
- Période 1972-1976
- Période 1977-1981
- Période 1995-2000
- Période 2006-2010
- Période 2012-2016
- Période 2014-2016
- Affaissements des secteurs Miéry – Savoye – Grange
Moussard

Isovaleurs des affaissements cumulés sur le site de Poligny de 1934 à 2016



Isovaleurs des affaissements cumulés sur le site de Poligny de 1972 à 1976



LEGENDE



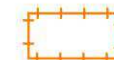
Courbe d'iso-affaissement
(en mètres)



Borne de nivellement mesurée
dans la période désignée

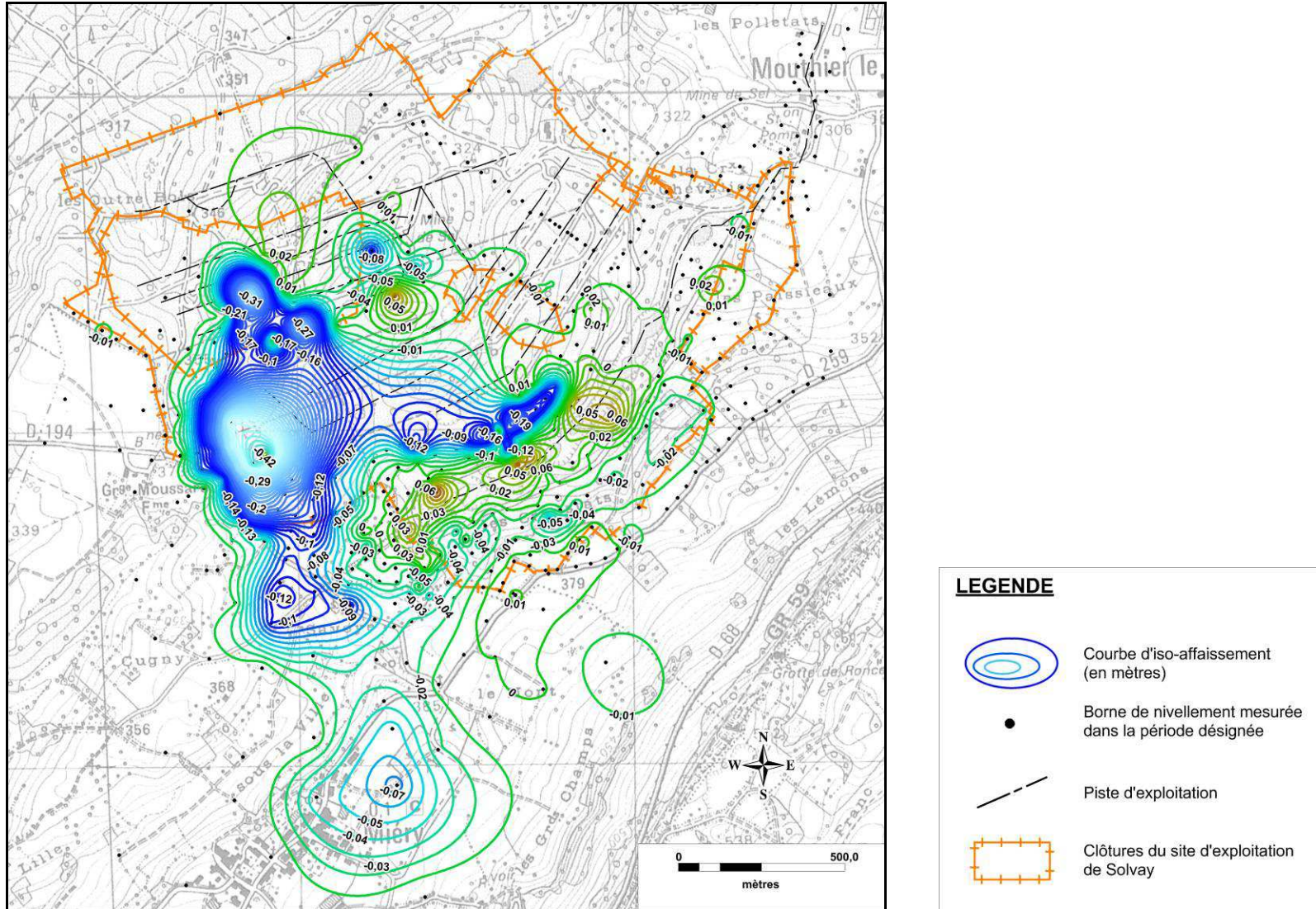


Piste d'exploitation

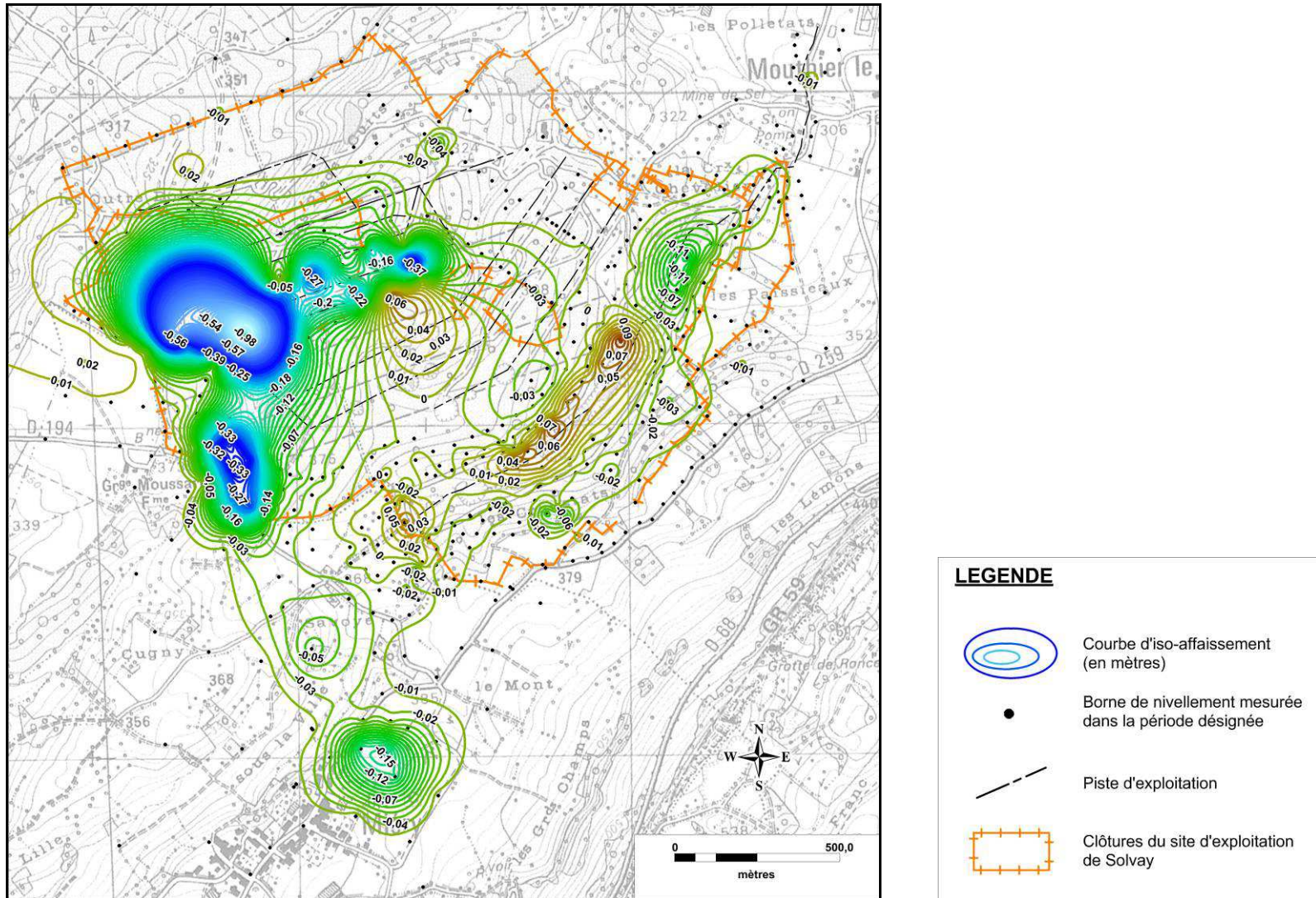


Clôtures du site d'exploitation
de Solvay

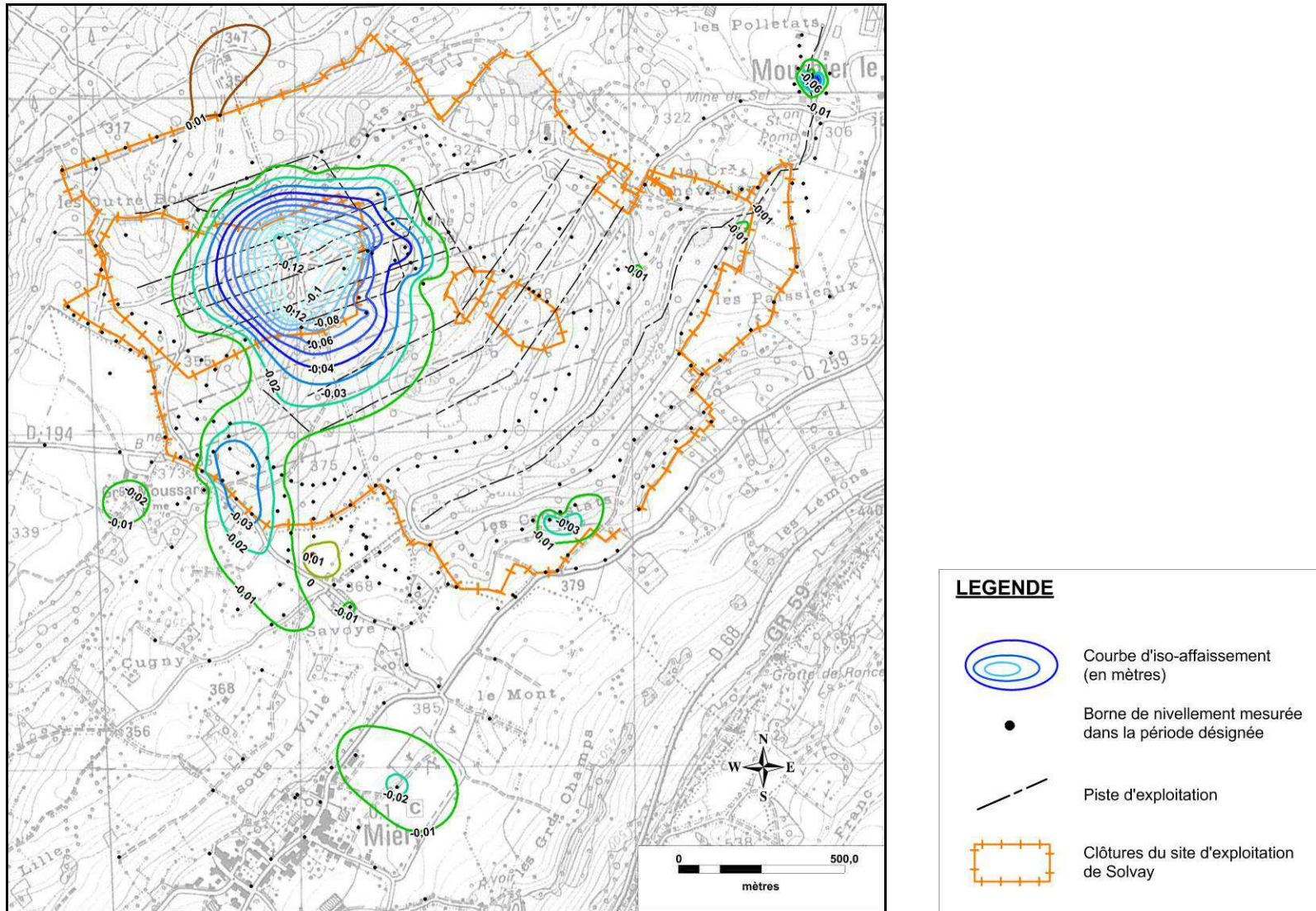
Isovaleurs des affaissements cumulés sur le site de Poligny de 1977 à 1981



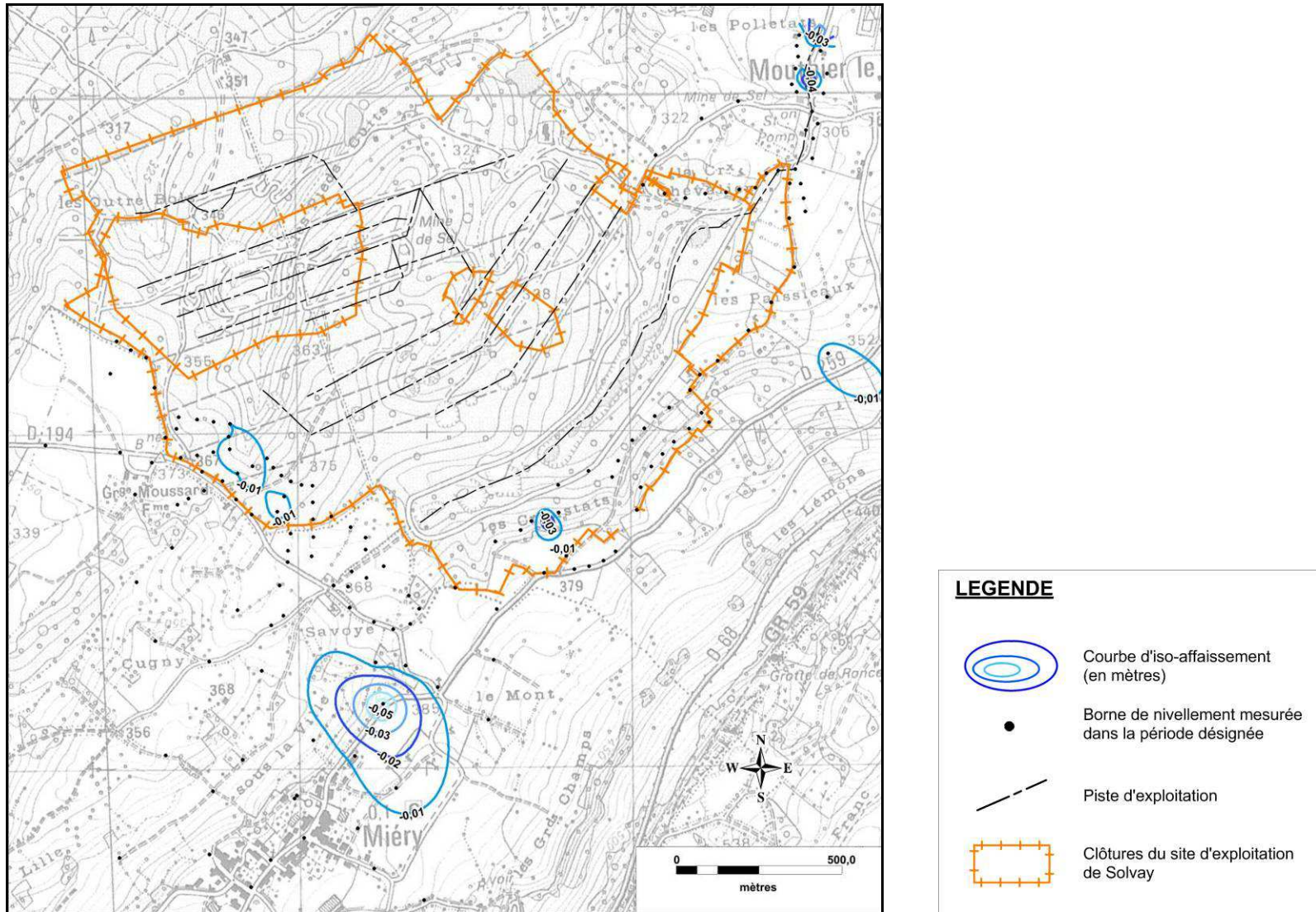
Isovaleurs des affaissements cumulés sur le site de Poligny de 1995 à 2000



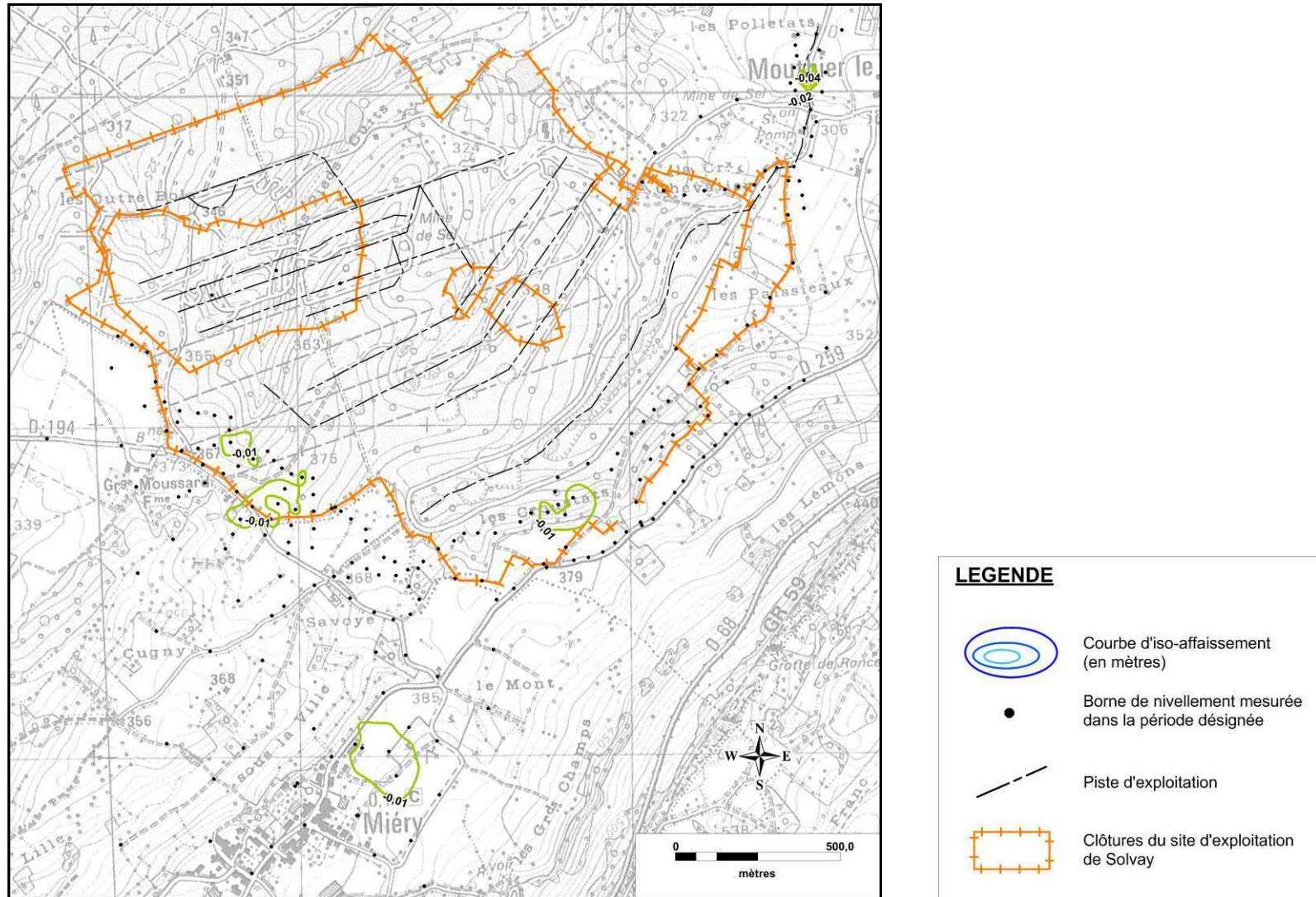
Isovaleurs des affaissements cumulés sur le site de Poligny de 2006 à 2010



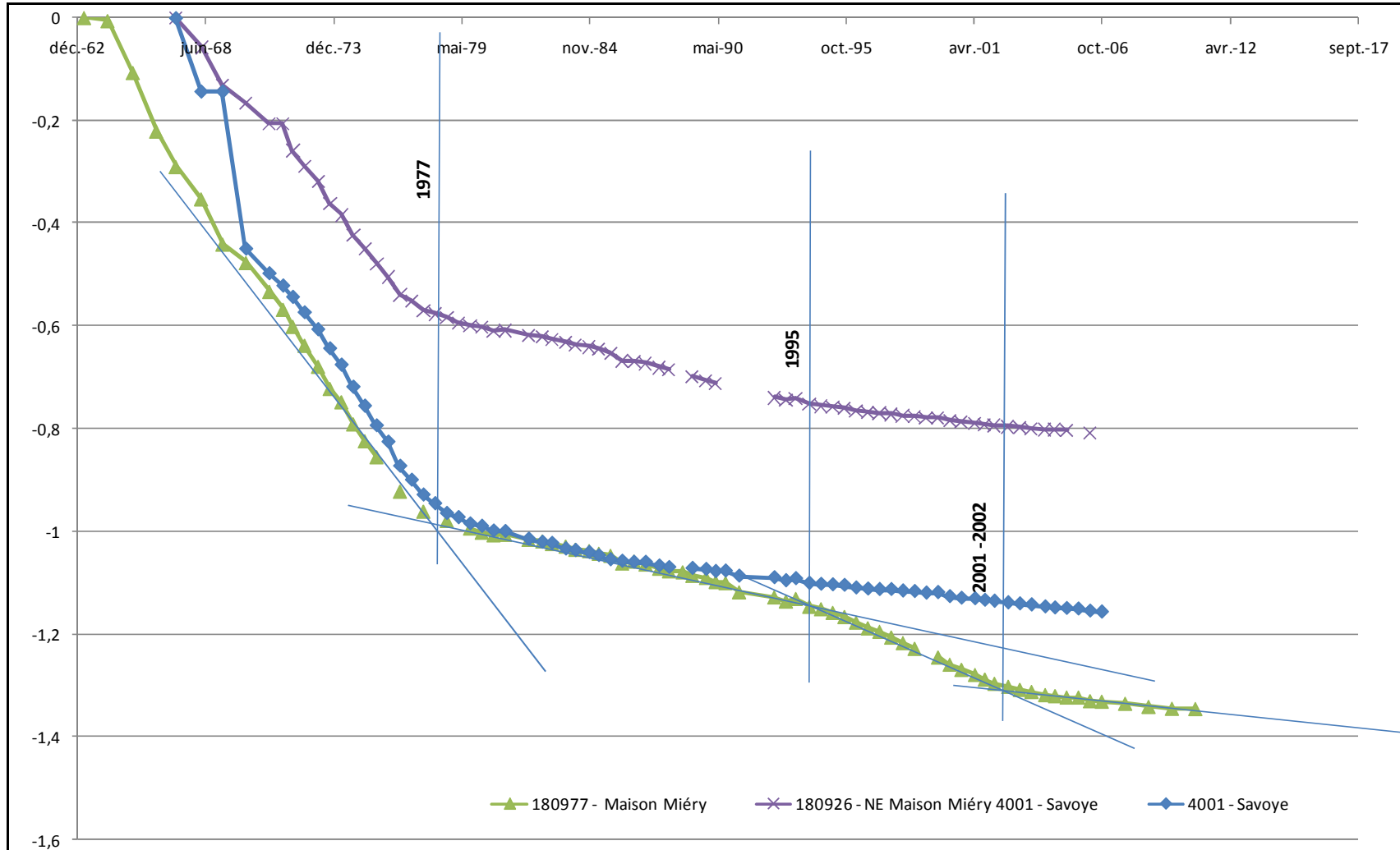
Isovaleurs des affaissements cumulés sur le site de Poligny de 2012 à 2016



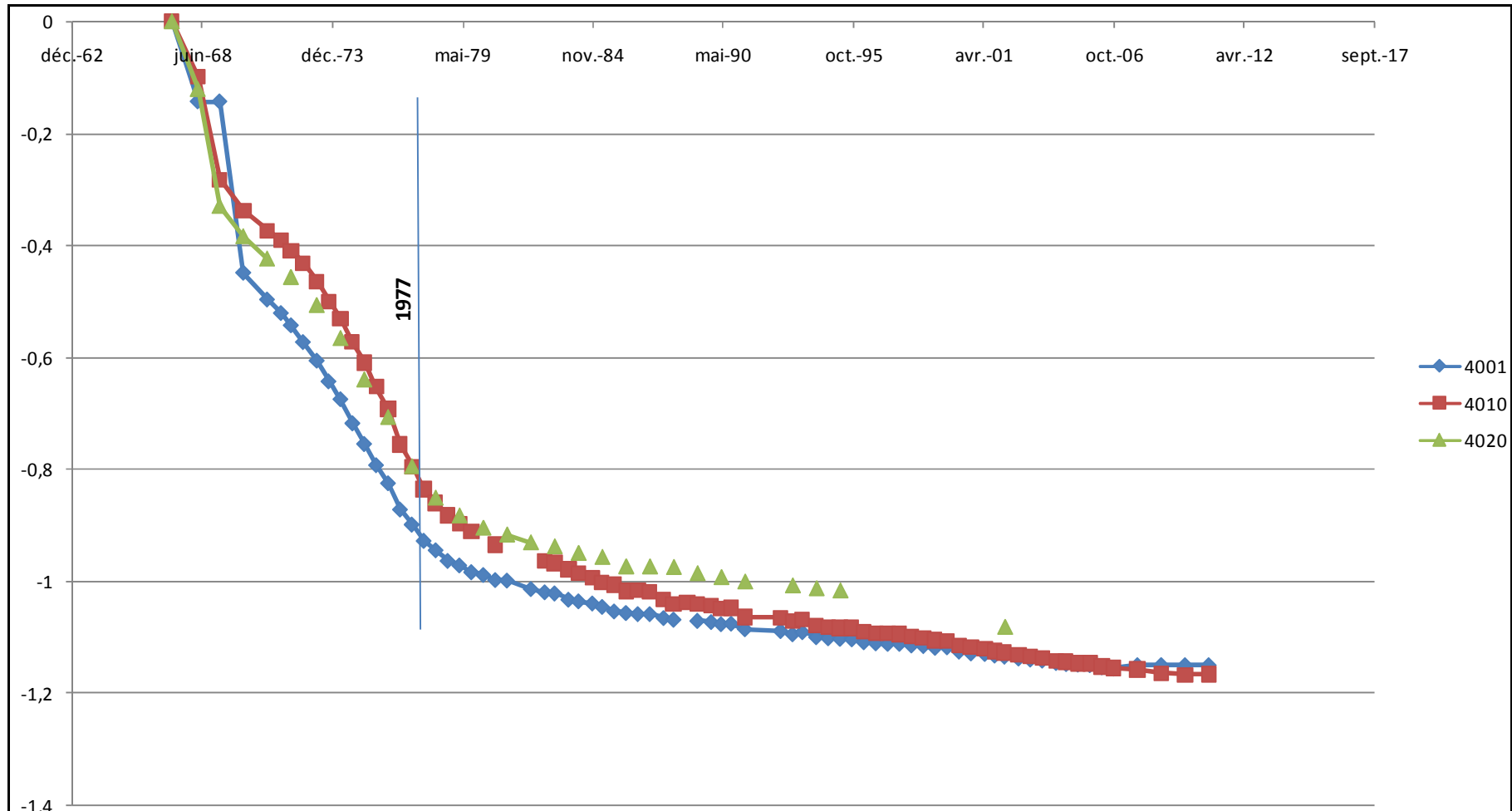
Isovaleurs des affaissements cumulés sur le site de Poligny de 2014 à 2016



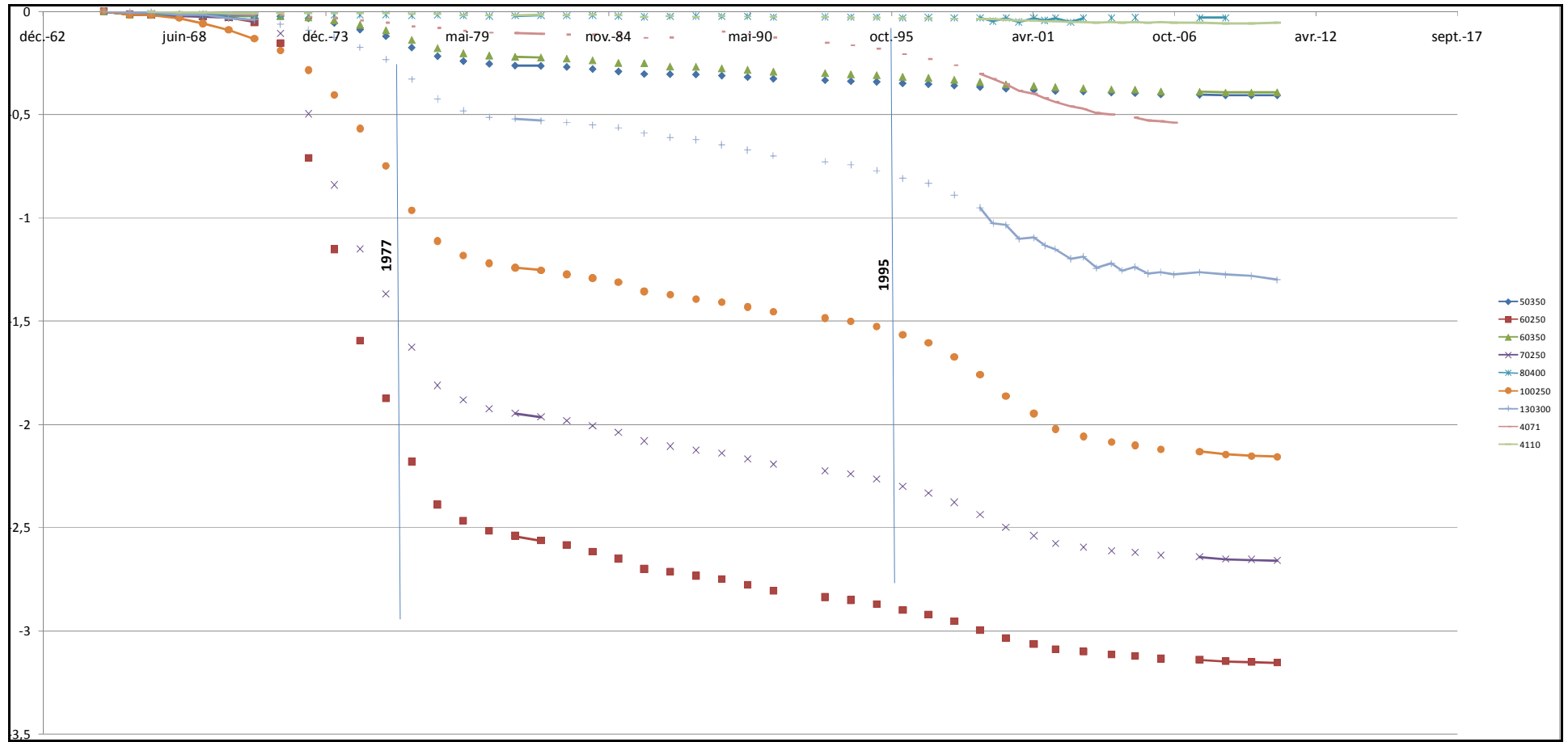
Comparaison des affaissements Miéry – Savoye



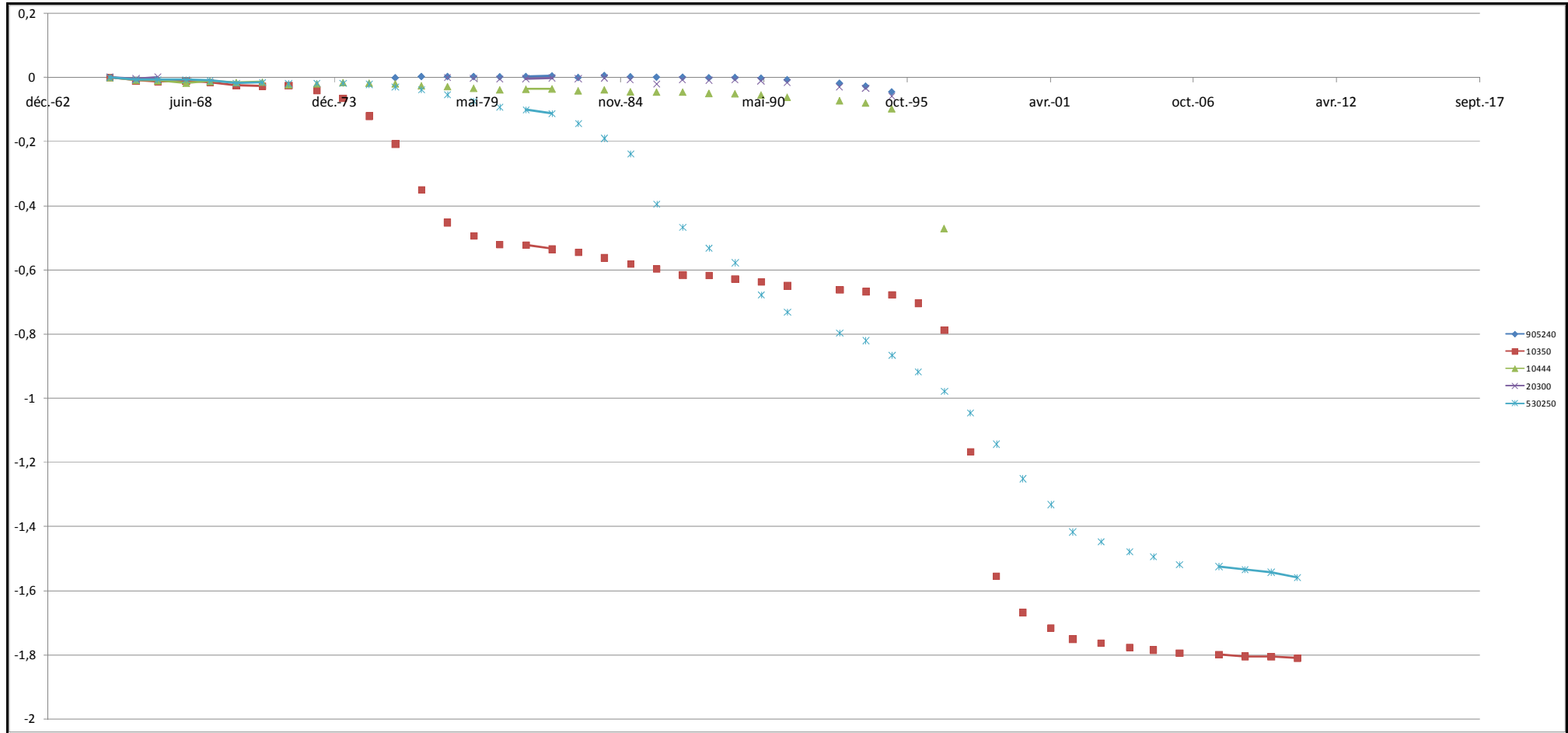
Affaissements Secteur Savoye



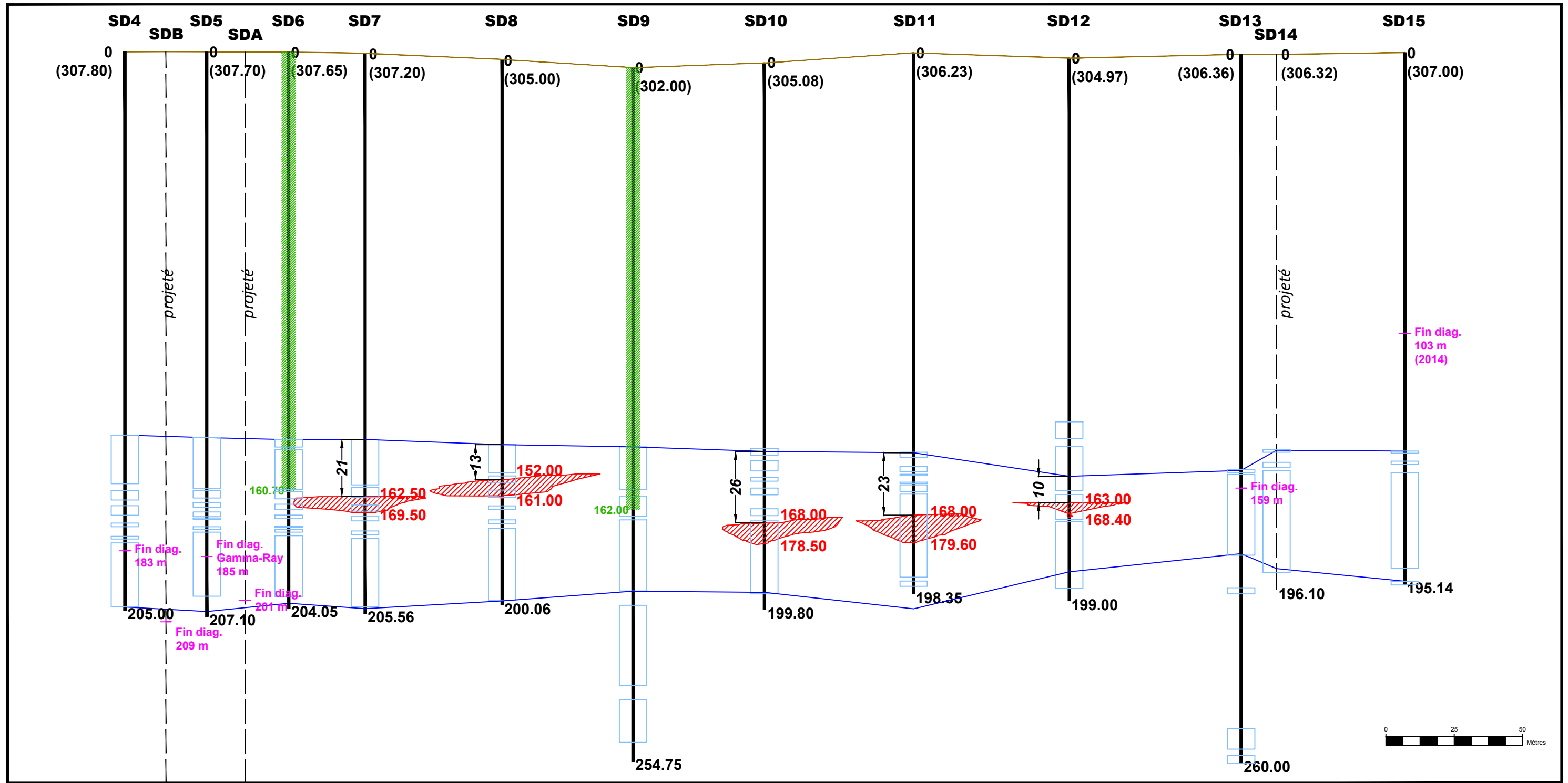
Affaissements secteur Amont Piste 100 –Grange Moussard



Affaissements Nouvelles Pistes



ANNEXE 6 : PROFIL DES SONDAGES DE LA PISTE 1



LEGENDE :

- Épaisseur de sel au toit de la cavité
- Bancs de sel
- Limites de la couche de sel retenues dans le SIG (Toit et Mur)
- Cimentation
- Cavité mesurée par SONAR
- Limite d'investigation par diagraphie

Les valeurs indiquées correspondent à des profondeurs. Seules les altitudes notées entre parenthèses correspondent à des cotes NGF.

PROFIL DES SONDAGES DE LA PISTE 1 - SITE D'EXPLOITATION DE SEL DE POLIGNY

Date	Auteur	Réf. étude	Format	Echelle	Coordonnées
08/12/2016	T.RICHARD/X.DAUPLEY	-	A3	-	Non définie



INERIS
 Direction des Risques du Sol et du Sous-sol
 Parc Technologique Alata BP 2 F-60550 VERNEUIL-EN-HALATTE
 www.ineris.fr

ANNEXE 7 : CARTE INFORMATIVE

ANNEXE 8 : CARTE DE L'ALÉA EFFONDREMENT DE TERRAIN

ANNEXE 9 : CARTE DE L'ALÉA AFFAISSEMENT DE TERRAIN

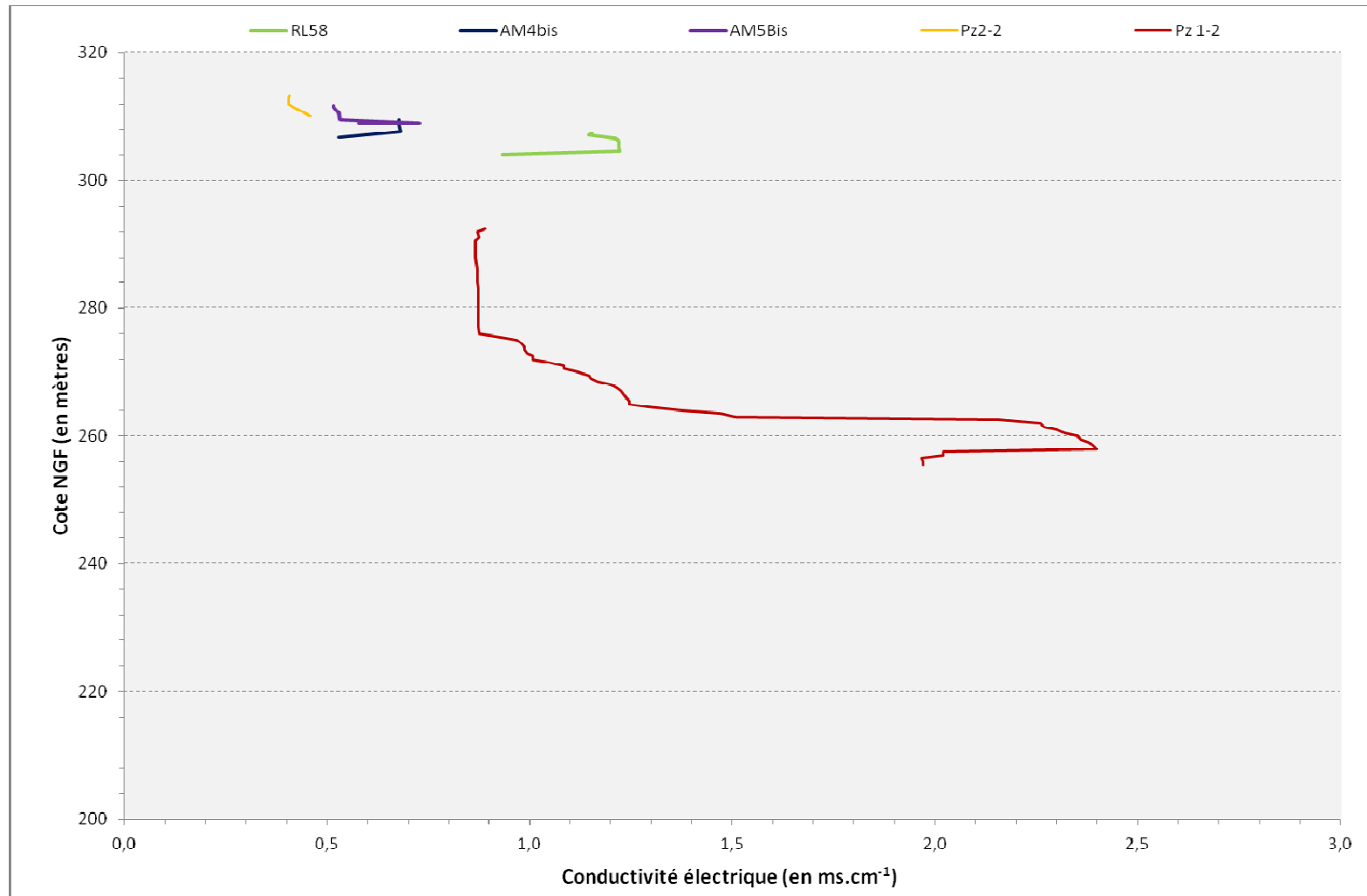
**ANNEXE 10 : CARTE DE L'ALÉA GLISSEMENT DE TERRAIN LIÉ
AUX CRATÈRES D'EFFONDREMENT**

**ANNEXE 11 : EXPLORATION DE LA CONDUCTIVITÉ
ÉLECTRIQUE DES PIÉZOMÈTRES RÉCENTS ET ANCIENS
IMPLANTÉS SUR LE SITE D'EXPLOITATION DE POLIGNY**

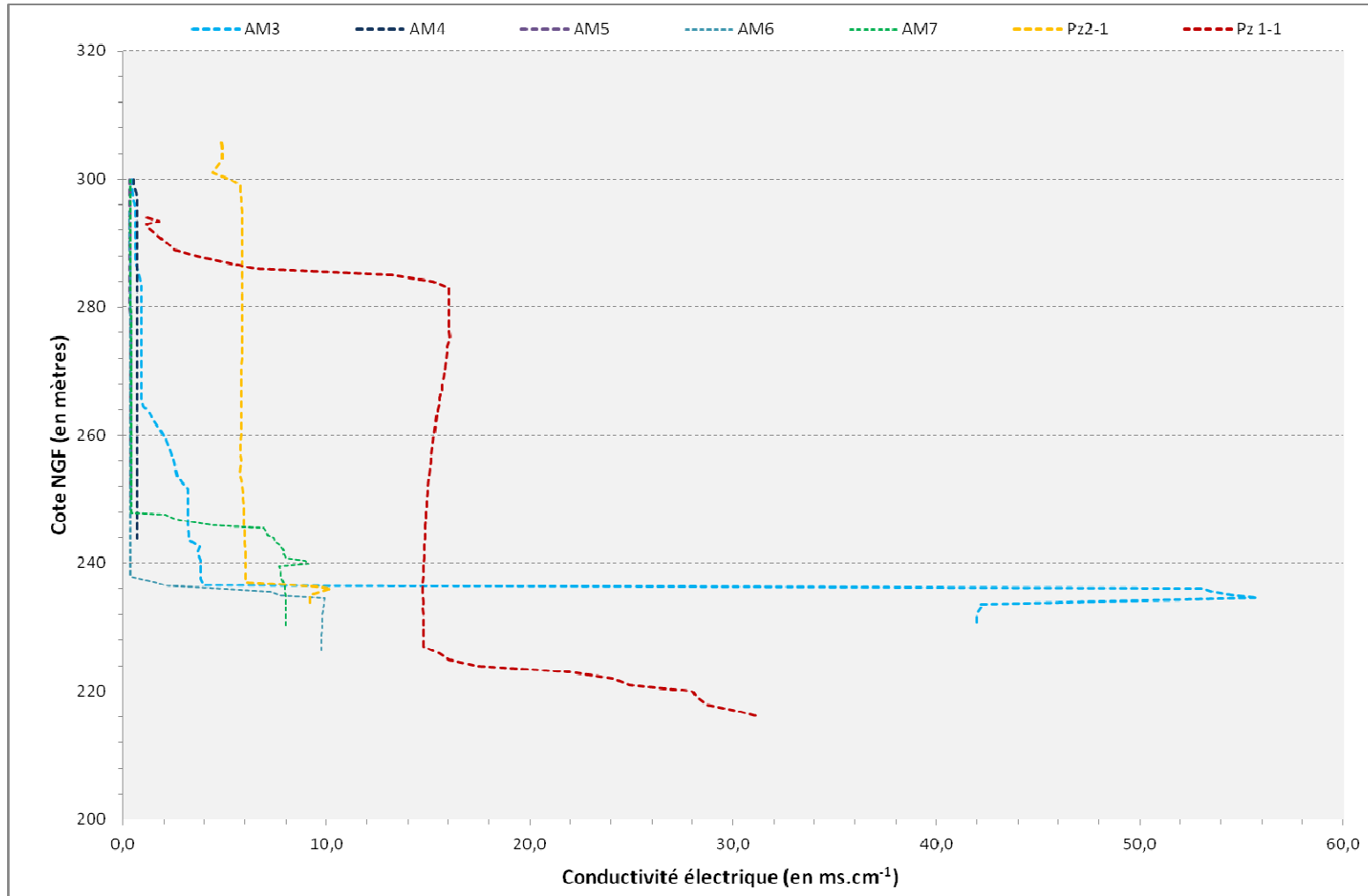
A.) Piézomètres atteignant la dolomie « 2 mètres »

B.) Piézomètres atteignant la dolomie « 10 mètres »

A.) Piézomètres atteignant la dolomie « 2 mètres »

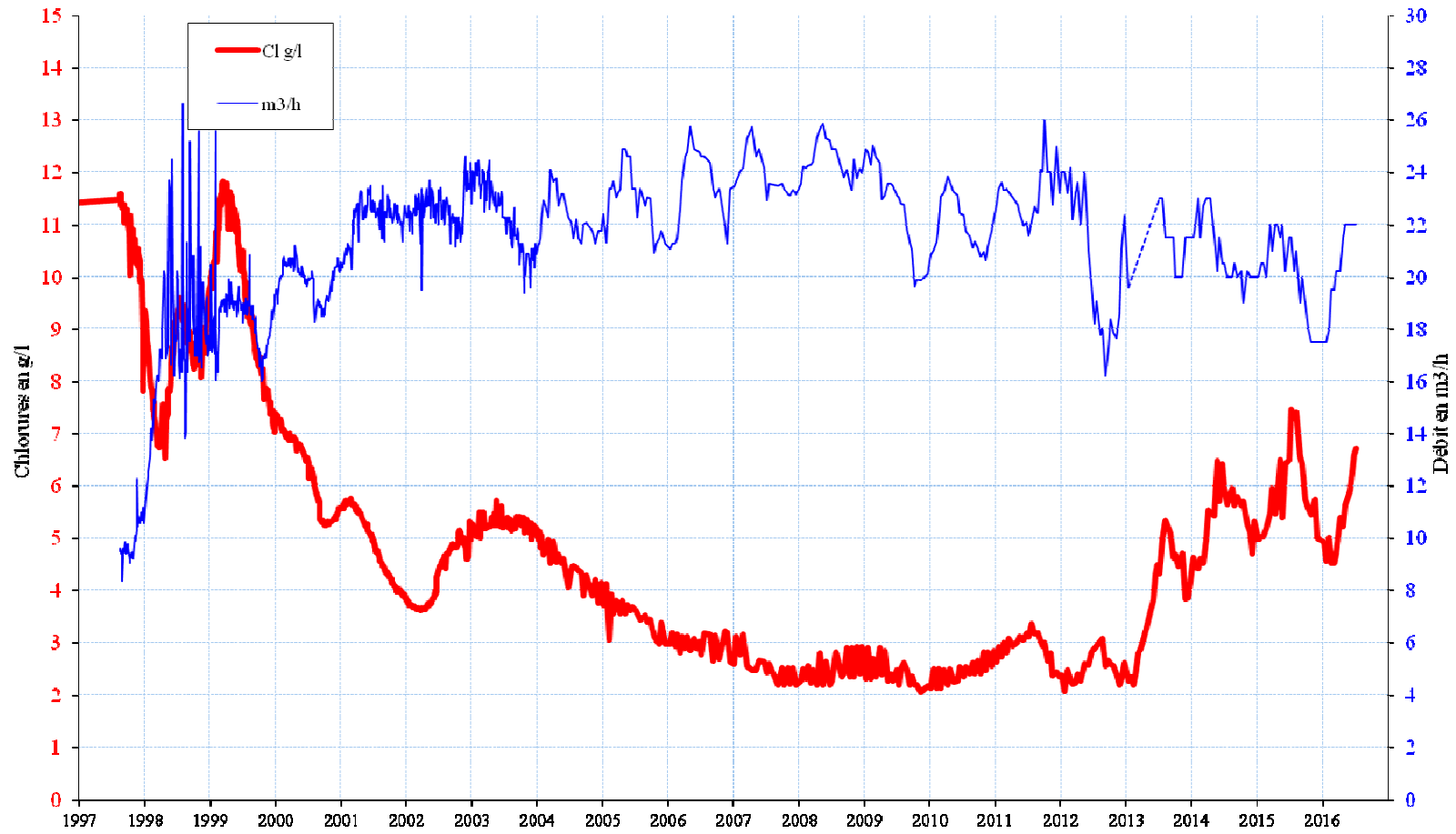


B.) Piézomètres atteignant la dolomie « 10 mètres »



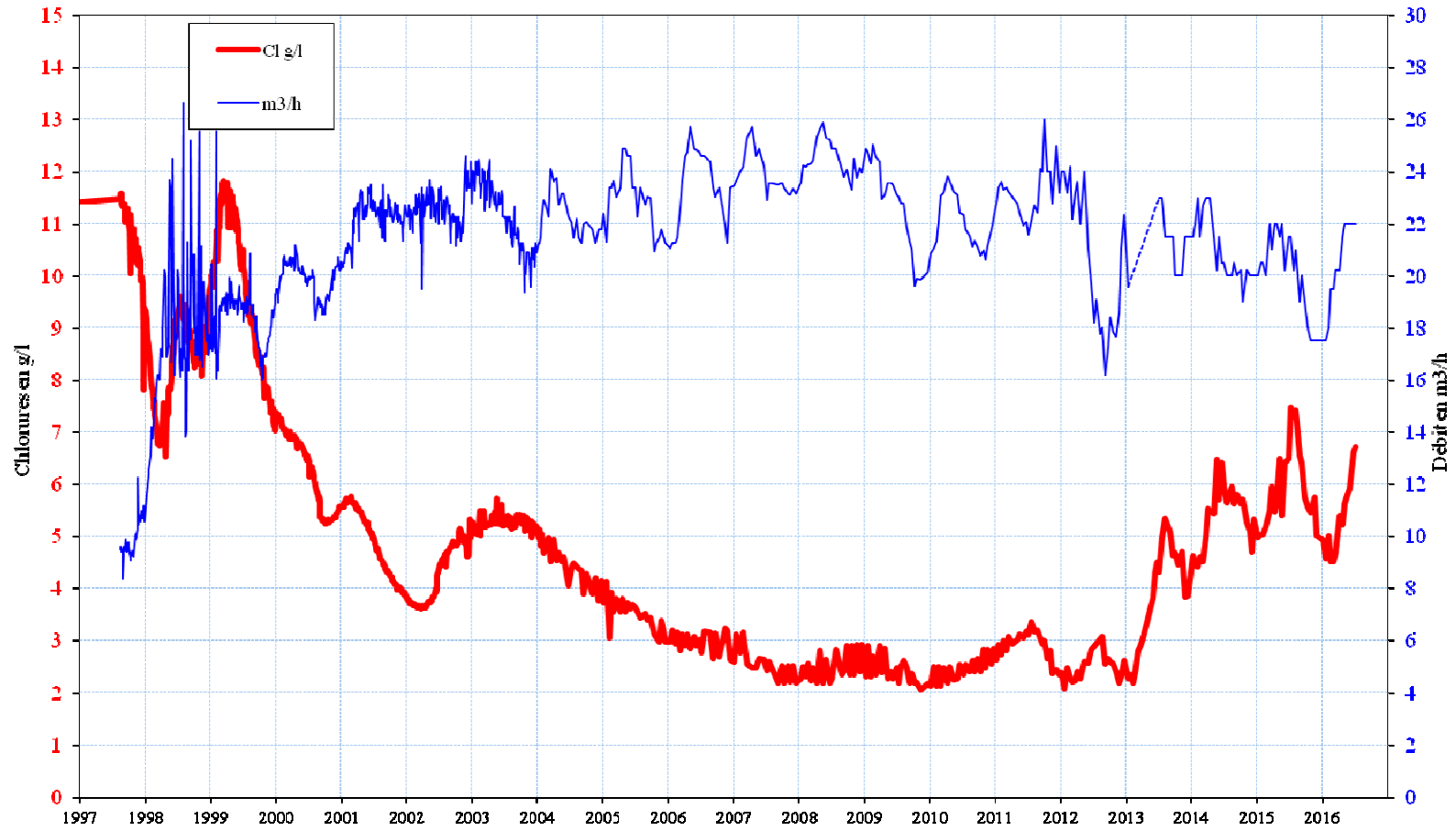
**ANNEXE 12 : EVOLUTION DES CONCENTRATIONS EN
CHLORURES ET DU DÉBIT DE LA SOURCE EH**

Source EH



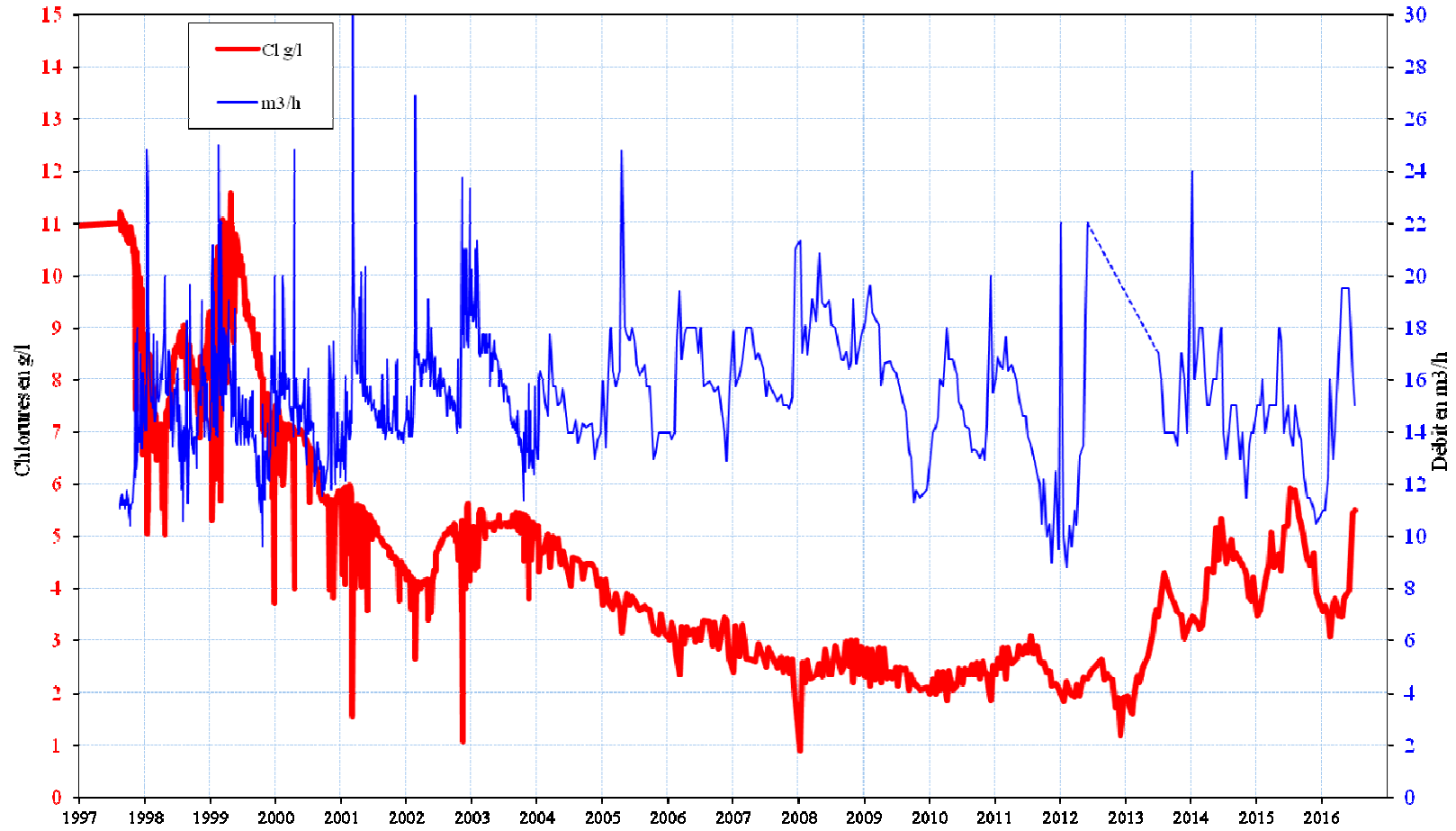
**ANNEXE 13 : EVOLUTION DES CONCENTRATIONS EN
CHLORURES ET DU DÉBIT DE LA SOURCE EI**

Source EI



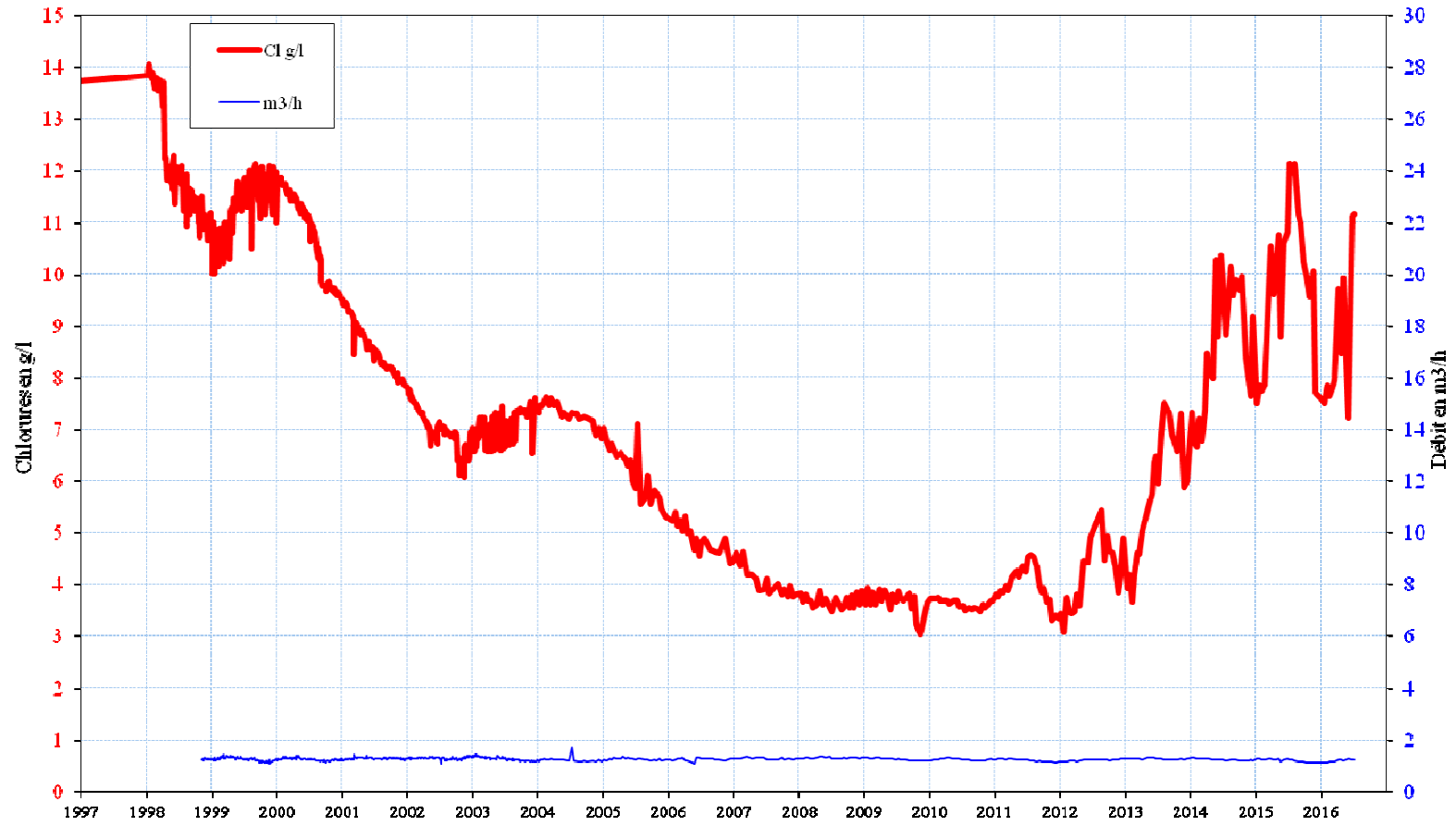
**ANNEXE 14 : EVOLUTION DES CONCENTRATIONS EN
CHLORURES ET DU DÉBIT DE LA SOURCE EJ**

Source EJ



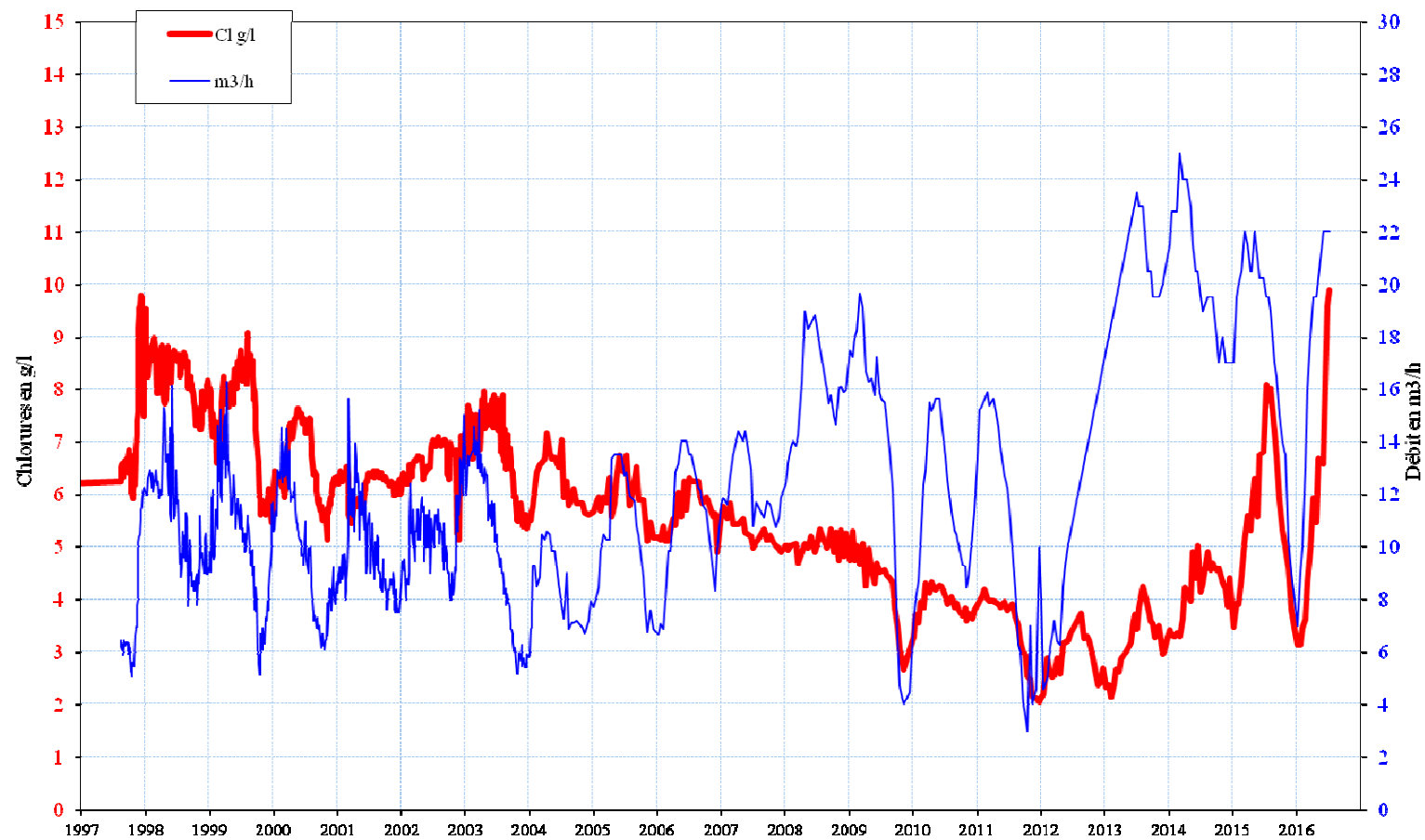
**ANNEXE 15 : EVOLUTION DES CONCENTRATIONS EN
CHLORURES ET DU DÉBIT DE LA SOURCE EK**

Source EK



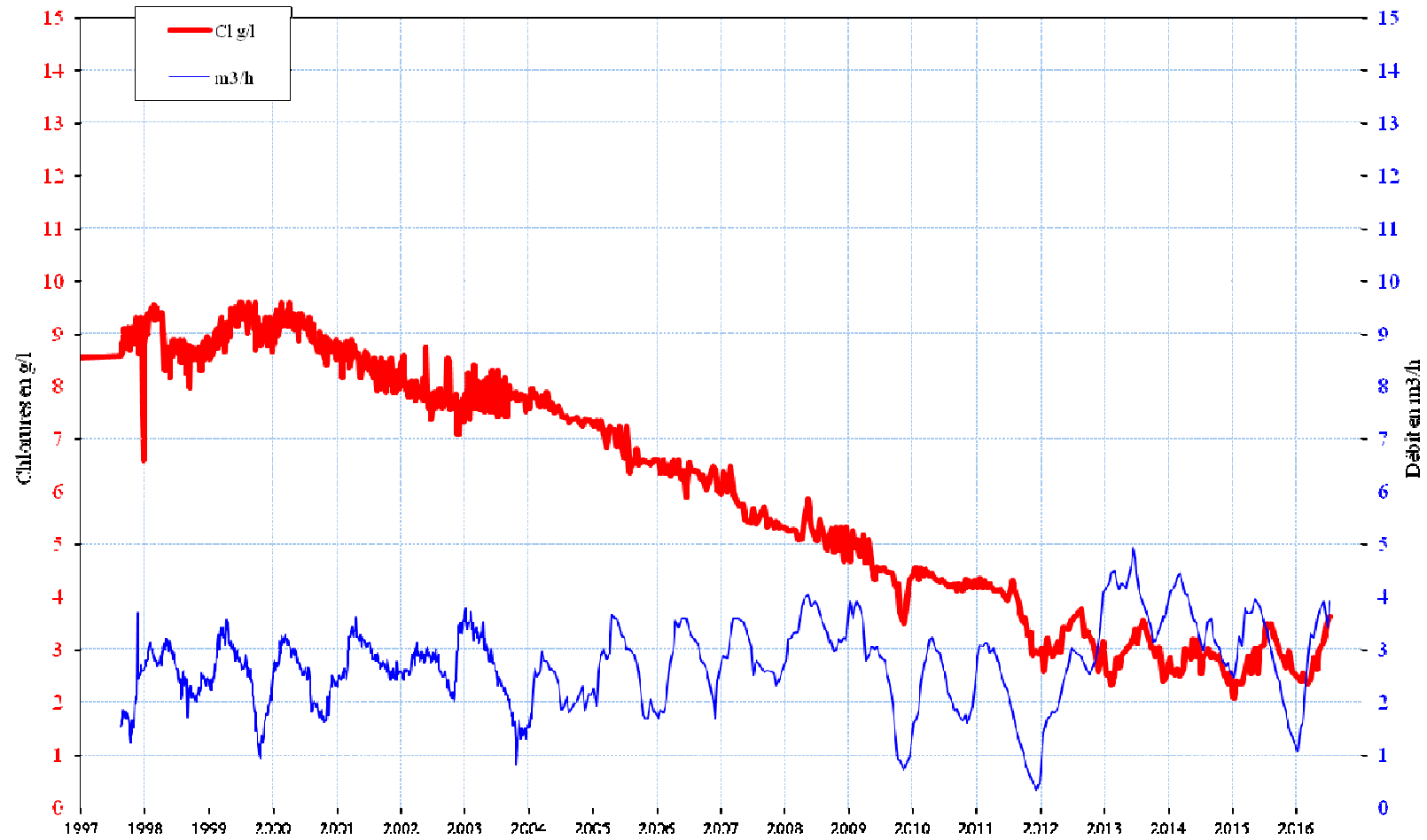
**ANNEXE 16 : EVOLUTION DES CONCENTRATIONS EN
CHLORURES ET DU DÉBIT DE LA SOURCE E0**

Source E0



**ANNEXE 17 : EVOLUTION DES CONCENTRATIONS EN
CHLORURES ET DU DÉBIT DE LA SOURCE E15**

Source E15

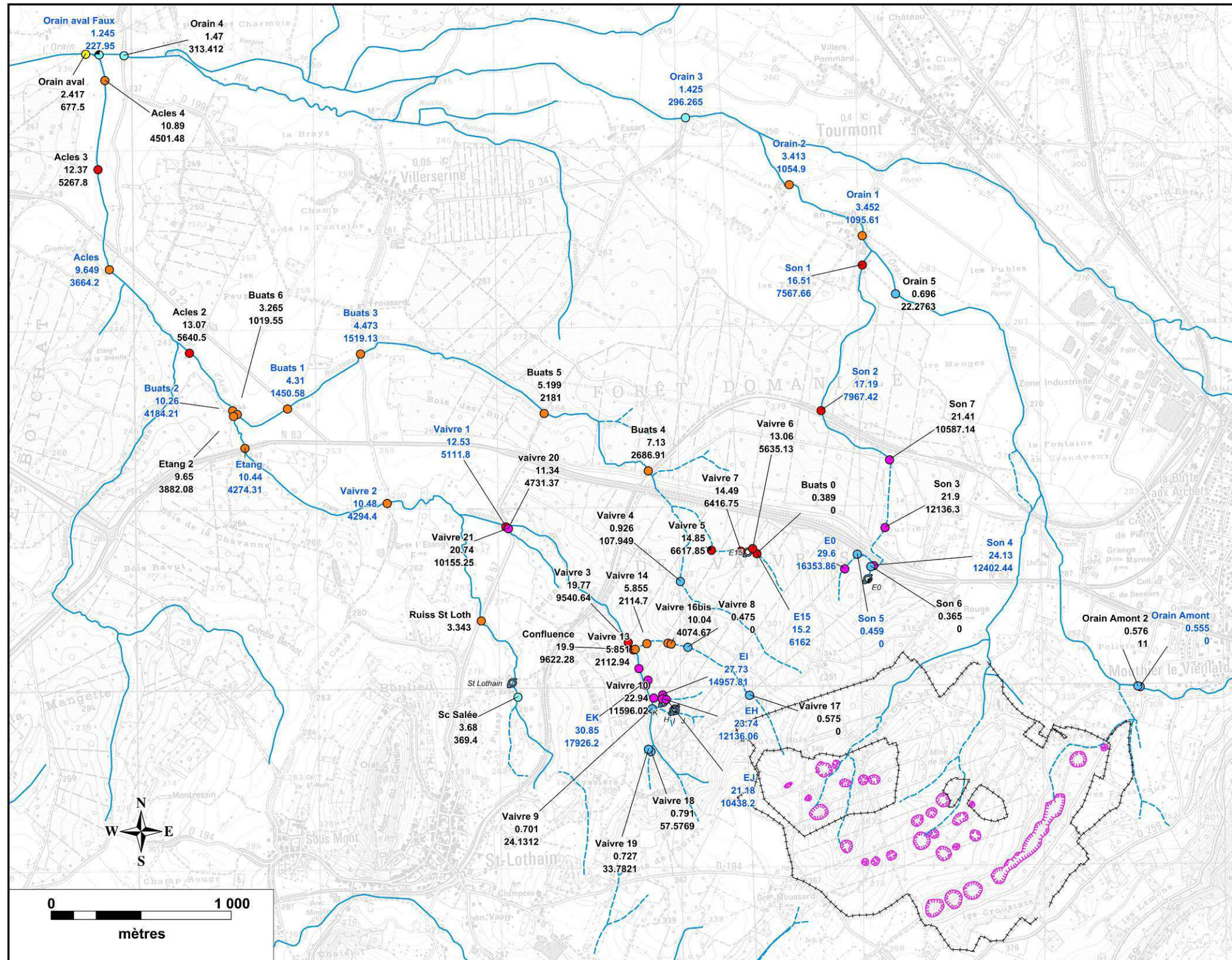


**ANNEXE 18 : CONCENTRATION EN NA₂CO₃ CALCULÉE SUR
L'ENSEMBLE DES POINTS DE MESURE À PARTIR DE LA
RELATION PRÉSENTÉE FIGURE 51**

Nom	Code Prelev	Y	X	Z	T	pH	cond St	[Sel]	Calc cond terrain
Acles	P1	6642691,156	899727,933	238,587	15,36	8,15	9,649		3664
Acles 2		6642224,748	900165,918	241,528	15,34	8,14	13,07		5640
Acles 2bis		6642224,748	900165,918	241,528	14,98	8,25	12,16		5157
Acles 3		6643246,405	899669,535	238,543	15,06	8,61	12,37		5268
Acles 4		6643739,51	899712,023	235,954	15,69		10,89		4501
Buats 0		6641088,184	903289,901	298,575	15,52	8,7	0,389		0
Buats 1		6641911,293	900705,101	244,588	16,28	8,1	4,31		1451
Buats 2		6641903,935	900401,915	241,614	15,19	8,35	10,26		4184
Buats 3		6642212,763	901110,733	251,718	16,41	7,85	4,473		1519
Buats 4		6641551,894	902693,467	281,882	14,92	8,22	7,13		2687
Buats 5	P4	6641874,372	902121,516	264,972	19,44	7,69	5,199		2181
Buats 6		6641883,243	900426,956	244,317	16,19	7,89	3,265		1020
Confluence		6640560,013	902604,1	274,89	15,28	8,06	19,9		9622
E0		6640999,635	903773,845	306,159	12,57	7	29,6		16354
E0	E0	6640999,635	903773,845	306,159	12,54	6,74	29,9		15494
E15	E15	6641088,184	903289,901	298,575	12,07	6,85	15,2		6162
EH		6640287,119	902759,926	301,457	13,84	6,86	23,74		12136
EI		6640310,228	902763,151	294,777	13,76	6,85	27,73		14958
EJ		6640283,7	902782,482	292,389	13,62	6,88	21,18		10438
EK	EK	6640391,974	902682,344	287,824	12,92	6,87	30,85		17926
Etang		6641695,352	900467,898	245,281	15,14	8,16	10,44		4274
Etang 2		6641872,509	900406,693	244,159	14,76	8,26	9,65		3882
Orain 1		6642844,962	903885,899	258,947	17,72	8,08	3,452		1096
Orain 2	P3	6643130,37	903485,526	255,748	17,73	8,18	3,413		1055
Orain 3		6643506,312	902916,191	251,066	16,28	8,17	1,425		296
Orain 4		6643876,701	899819,38	239,254	14,64	8,51	1,47		313
Orain 5		6642521,034	904067,284	262,646	14,54	8,44	0,696		22
Orain Amont		6640333,228	905399,326	301,996	14,03	8,31	0,555		0
Orain Amont 2	P6	6640337,057	905386,665	302,193	11,84	8,48	0,576		11
Orain aval	P7	6643886,528	899607,214	234,736	15,09	8,4	2,417		678
Orain aval Faux		6643882,906	899681,601	236,262	14,53	8,17	1,245		228
Ruiss St Loth		6640727,897	901764,444	262,943	13,84	7,37	3,343		1051
Sc Salée	Sc Sal	6640303,645	901963,34	263,731	12,77	7,61	3,68		369
Son 1		6642682,307	903885,626	263,256	17,28	8,14	16,51		7568
Son 2		6641877,143	903650,845	270,471	16,23	8	17,19		7967
Son 3	P5	6641226,303	903998,195	278,957	13,9	7,88	21,9		12136
Son 4		6641015,413	903933,85	292,457	13,13	7,43	24,13		12402
Son 5		6641080,023	903843,571	289,322	16,28	8,51	0,459		0
Son 6		6641010,735	903917,917	291,605	14,23	8,13	0,365		0
Son 7		6641601,098	904026,152	279,831	13,59	7,92	21,41		10587
Vaivre 1	P2	6641248,611	901904,932	254,05	14,39	8,1	12,53		5112
Vaivre 10		6640293,047	902712,965	281,984	14,02	7,5	22,94		11596
Vaivre 11		6640362,702	902669,772	281,154	14,5	7,84	21,32		10529
Vaivre 12		6640456,389	902632,942	286,916	14,88	8,05	22,05		11005
Vaivre 13		6640564,202	902613,613	277,63	15,62	8,25	5,851		2113
Vaivre 14		6640594,529	902677,718	281,036	15,32	8,16	5,855		2115
Vaivre 15		6640596,114	902793,787	287,184	13,72	7,62	6,854		2561
Vaivre 16		6640590,583	902811,533	295,851	16,12	8,37	0,585		0
Vaivre 16bis		6640590,583	902811,533	295,851	12,02	6,9	10,04		4075
Vaivre 17		6640303,596	903242,233	315,301	16,82	8,23	0,575		0
Vaivre 18		6639996,301	902695,441	299,222	15,29	8,15	0,791		58
Vaivre 19		6640009,028	902681,568	288,968	14,55	8,12	0,727		34
Vaivre 2		6641383,148	901250,9	253,481	14,49	8,17	10,48		4294
Vaivre 20		6641238,105	901918,806	253,771	16,63	7,92	11,34		4731
Vaivre 21		6641238,105	901918,806	253,771	13,68	8,1	20,74		10155
Vaivre 3		6640601,944	902574,812	271,534	14,58	8,06	19,77		9541
Vaivre 4		6640937,251	902865,938	300,405	15,18	7,84	0,926		108
Vaivre 5		6641108,333	903038,797	288,426	14,53	8,68	14,85		6618
Vaivre 6		6641115,823	903266,484	293,863	12,89		13,06		5635
Vaivre 7		6641102,404	903201,093	294,143	14,02	7,97	14,49		6417
Vaivre 8		6640572,502	902904,293	298,852	16,36	8,58	0,475		0
Vaivre 9		6640233,193	902703,757	284,38	16,14	8,1	0,701		24

**ANNEXE 19 : LOCALISATION CARTOGRAPHIQUE DES
MESURES DE MINÉRALISATION EFFECTUÉES ET DE LA
CONCENTRATION EN NACL CALCULÉE POUR CHAQUE
POINT**

Analyses des cours d'eau à proximité du site d'exploitation de sel de Poligny

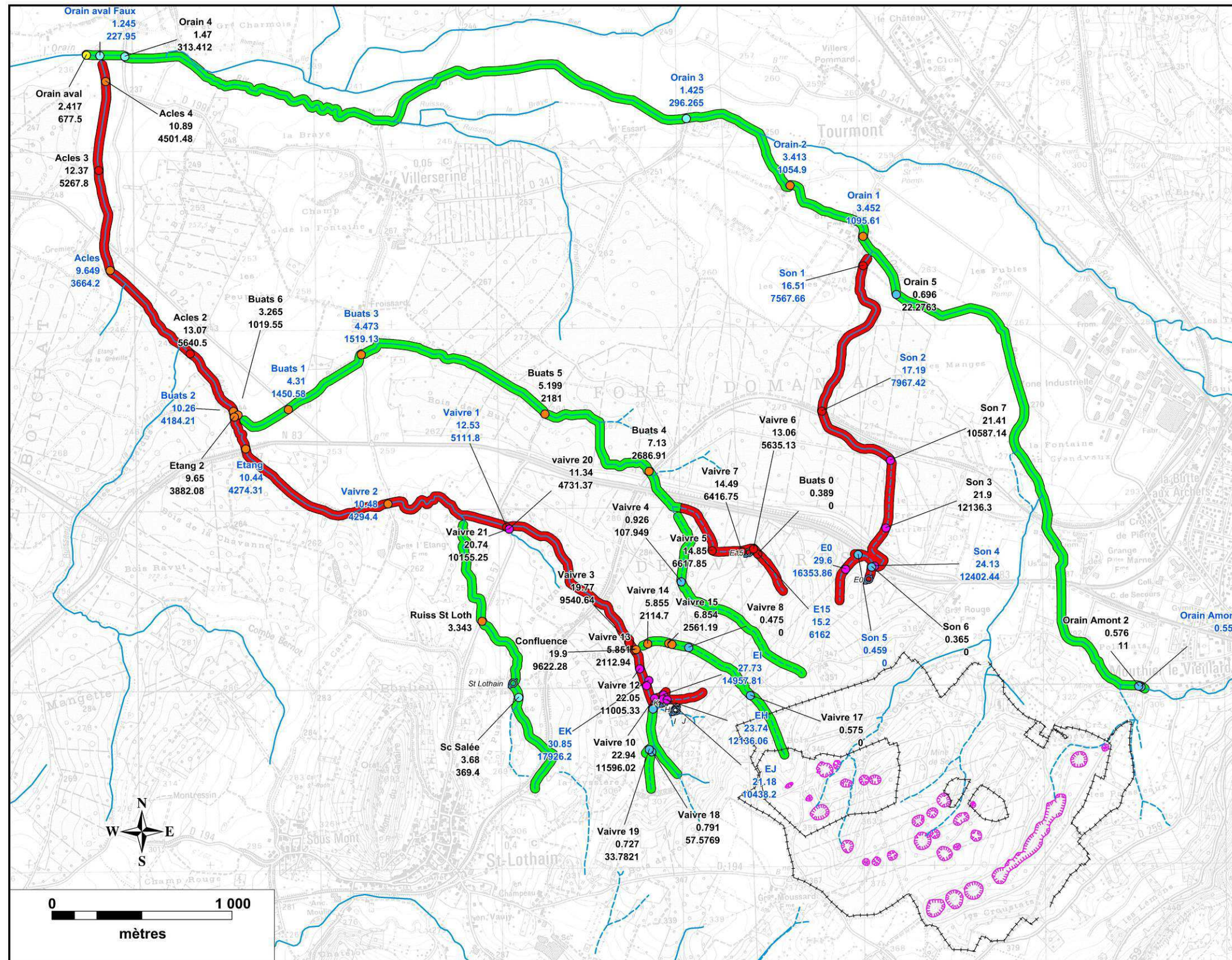


LEGENDE

- Cratère d'effondrement
 - Cloture du site d'exploitation de Poligny
 - Cours d'eau permanent
 - Cours d'eau temporaire
 - Source
 - Point de pélèvement
- Nom Conductivité (mS/cm) Salinité (mg/L)
 Bleu : avec dilution
 Noir : sans dilution
- Salinité de l'eau (mg/L)
 < 200
 200 < S < 500
 500 < S < 1 000
 1 000 < S < 5 000
 5 000 < S < 10 000
 10 000 < S < 20 000

**ANNEXE 20 : CARTOGRAPHIES (JUILLET 2016) DES ZONES DU
RÉSEAU HYDROGRAPHIQUE IMPACTÉES PAR LES
CONCENTRATIONS EN SEL AVEC ET SANS APPORTS
D'EAU DE DILUTION DE L'EXPLOITANT
([NACL] < OU > 5 G.L⁻¹)**

**Analyses des cours d'eau à proximité du site d'exploitation de sel de Poligny
TENEUR EN SEL SANS DILUTION**



LEGENDE

- Cratère d'effondrement
- Cloture du site d'exploitation de Poligny
- Cours d'eau permanent
- Cours d'eau temporaire
- Source

Salinité du cours d'eau (mg/L)

- < 5 000
- > 5 000

Point de prélèvement

Nom Conductivité (mS/cm) Salinité (mg/L)

Bleu : avec dilution
Noir : sans dilution

Salinité du prélèvement (mg/L)

- < 200
- 200 < S < 500
- 500 < S < 1 000
- 1 000 < S < 5 000
- 5 000 < S < 10 000
- 10 000 < S < 20 000

**Analyses des cours d'eau à proximité du site d'exploitation de sel de Poligny
TENEUR EN SEL AVEC DILUTION**

