



COMPAGNIE DES SALINS DU MIDI
ET DES SALINES DE L'EST

Clichy Pouchet – Bâtiment A
92-98 Boulevard Victor HUGO
92115 Clichy

DÉCLARATION D'ARRÊT DÉFINITIF DES TRAVAUX MINIERS ET D'UTILISATION DES INSTALLATIONS ASSOCIÉES

CONCESSION DE MINES DE SEL ET SOURCES D'EAUX
SALEES DE MONTMOROT

(JURA)

Document E

Mémoire décrivant le bilan des effets des travaux miniers,
et de l'arrêt de l'exploitation
sur la tenue des terrains de surface

Signataire de la déclaration

Patrick DALLA VALLE, Directeur Industriel
Compagnie des Salins du Midi et des Salines de l'Est
Groupe Salins

Clichy Pouchet – Bâtiment A
92-98 Boulevard Victor HUGO
92115 Clichy
☎ : 01.75.61.78.00

Chargés du dossier

Emmanuel HERTZ, Responsable pôle technique minier
Wendy LAURENT, Responsable ingénierie administrative minière
Compagnie des Salins du Midi et des Salines de l'Est

17, rue Gabriel PERI
54 110 Varangéville
☎ : 03.83.18.73.00

Novembre 2018

INTRODUCTION.....	5
1. MOUVEMENTS DE TERRAIN ANTERIEURS ET CONTEMPORAINS DE L'EXPLOITATION INDUSTRIELLE	5
1.1. MOUVEMENTS DE TERRAINS ANTERIEURS A L'ETABLISSEMENT DE LA CONCESSION.....	5
1.2. MOUVEMENTS DE TERRAINS CONTEMPORAINS A L'EXPLOITATION INDUSTRIELLE.....	6
2. MOUVEMENTS DE TERRAIN POSTERIEURS A L'ARRET DE L'ACTIVITE INDUSTRIELLE	10
2.1. ENTRE 1966 ET 2006.....	11
2.2. DE 2006 A 2018	13
2.3. CONCLUSION	14
3. IMPACT DE LA METHODE D'EXPLOITATION SUR LA STABILITE DES TERRAINS	15
3.1. ELEMENTS DE REFLEXION SUR LA GEOMETRIE DES VIDES SOUTERRAINS	15
3.2. EVALUATION DU VOLUME DESTRUCTURE	15
3.3. MECANISMES DE FERMETURE DES VIDES SOUTERRAINS.....	18
3.4. MECANISMES RETENUS.....	21
3.5. CONCLUSIONS.....	25
4. DESCRIPTION DES MOUVEMENTS DE TERRAIN RESIDUELS ENVISAGEABLES	25
4.1. BILAN DES VIDES RESIDUELS DANS LE SOUS-SOL	25
4.2. MOUVEMENTS DE TERRAIN DE SURFACE ENVISAGEABLES	26

Table des illustrations

Figure E- 1 : Nivellement pendant l'exploitation industrielle.....	7
Figure E- 2 : Suivi de nivellement autour du sondage n°12.....	8
Figure E- 3 : Localisation de la zone de marécage par rapport aux bornes de nivellement.....	9
Figure E- 4 : Affaissement lié à l'exploitation du sondage n°12 et de ses voisins	10
Figure E- 5 : Suivi de nivellement au niveau du secteur des sondages 7, 8, 12 et 13.....	11
Figure E- 6 : Résultat du nivellement sur le secteur de Montmorot entre 1973 et 1991 (courbes d'iso valeurs en mm) - INERIS	12
Figure E- 7 : Résultat du nivellement dur le secteur de Montmorot entre 1991 et 2004 (courbes d'iso valeurs en mm) - INERIS	12
Figure E- 8 : Bilan du nivellement sur la période de 2006 à 2018.....	14
Figure E- 9 : Eléments de géométrie de l'enveloppe déstructurée.....	16
Figure E- 10 : Coupe de l'extension de la dissolution liée à l'exploitation des sondages	18
Figure E- 11 : Extension horizontale projetée de la dissolution liée à l'exploitation par sondage.....	18
Figure E- 12 : Convergence de la voûte	20
Figure E- 13 : Lithostratigraphie locale de Montmorot – Coupe du sondage 20.....	21
Tableau E- 1 : Rayon de l'enveloppe conique déstructurée des sondages exploités	17
Tableau E- 2 : Détermination du volume de vide résiduel suivant le coefficient de foisonnement k à la suite de la subsidence des terrains de surface	23
Tableau E- 3 : Eléments de géométrie de la voûte d'effondrement du toit des cavités	24

Introduction

Ce dossier fait référence aux conclusions de l'expertise de stabilité réalisée en 1965 par J.J COLLIN, G. LIENHARDT et R. CAMUS « La dissolution du sel du Keuper inférieur dans la région de Montmorot (Jura) : Phénomène naturel activé artificiellement », ainsi qu'au rapport établi par l'INERIS le 12 avril 2007 « Analyse des mesures de nivellement réalisées dans la concession de sel de Montmorot (Jura) ».

Le sel est exploité à Montmorot depuis l'époque romaine. Ci-dessous un bilan des quantités extraites :

De l'époque romaine à 1733 :	1 850 000 tonnes
De 1733 à 1845, par sources :	896 000 tonnes
De 1837 à 1937, par sondages :	1 500 000 tonnes
De 1937 à 1965, par sondages :	861 000 tonnes
Soit 5 107 000 tonnes de sel extraites, soit 2,2 millions de m ³ .	

1. Mouvements de terrain antérieurs et contemporains de l'exploitation industrielle

1.1. Mouvements de terrains antérieurs à l'établissement de la concession

La période qui se situe avant la date d'institution de la concession de MONTMOROT (6 janvier 1842) constitue l'« état initial ».

Selon les archives, des sources salées auraient existé bien avant la création des sondages. Leur présence s'est traduite par la salure d'eaux ou de puits naturels (puits salé à Lons-Le-Saunier, puits à Muire à Montmorot, puits de l'étang du saloir au nord de Montmorot, puits de la gypserie).

Un article paru en 1850 dans « Travaux de la Société d'Emulation du département du Jura » donne les renseignements suivants :

- 1703 : éboulement à Lons-Le-Saunier : un petit bâtiment situé dans la ville s'enfonce
- 1709 : affaissement aux salines
- 1712 : éboulement à Lons-Le-Saunier
- 1715 : enfouissement du sol à Lons-Le-Saunier
- 1734 : éboulement à Lons-Le-Saunier
- 1737 : effondrement d'un mur de clôture, à l'emplacement de l'éboulement de 1703
- 1738 : enfouissement du sol à Lons-Le-Saunier
- 1760 : enfouissement du sol à Lons-Le-Saunier
- 1768 : enfouissement du sol à Lons-Le-Saunier
- 1792 : effondrement d'une maison, à l'emplacement des éboulements de 1703 et 1737, dans un gouffre de 18 m de diamètre ; un deuxième gouffre de 8 m de diamètre (6.5 de profondeur) s'ouvre dans la ville
- 1813 : lézardes dans les murs d'une maison située à l'emplacement sensible : 1703, 1737, 1792, 1813
- 1841 : mouvements du sol signalés aux mêmes endroits qu'en 1792

⇒ Une dizaine de mouvements de terrains antérieurs à l'exploitation ont été répertoriés.

1.2. Mouvements de terrains contemporains à l'exploitation industrielle

Un article paru en 1850 dans « Travaux de la Société d'Emulation du département du Jura » donne les renseignements suivants :

1848 : affaissements à l'emplacement déjà affecté en 1792 (2°) et 1814

1849 : éboulements aux mêmes endroits qu'en 1792 et 1841 : gouffres de 8 m et 7 m de profondeur environ

Ces deux évènements ont eu lieu sur la commune de Lons-le-Saunier, à distance de la zone exploitée. Aucun évènement de type effondrement n'est recensé sur la commune de Montmorot. Aucun accident d'ampleur n'a été rapporté entre 1849 et 1937.

1.2.1. Mouvements mesurés par nivellement

En 1937, la commune de Montmorot a demandé un suivi de nivellement suite à l'apparition de plusieurs affaissement. Par arrêté préfectoral du 30 avril 1949, la mesure des mouvements du sol fut rendue obligatoire. Depuis 1949, les nivellements ont été dressés, et aucun dommage notable n'a été signalé. Le réseau a été étendu en 1965, juste avant l'arrêt de l'exploitation, avec l'ajout de 9 bornes.

Le réseau de nivellement actif en 1949, date des premières mesures disponibles, était essentiellement localisé autour de la mairie, au sud-ouest du champs d'exploitation, et sur quelques têtes de sondage (7, 8, 10 et 18). Entre 1949 et 1965, l'exploitation a eu lieu sur les sondages 12, 15, 16, 17, 18 et 20 (Figure E- 1).

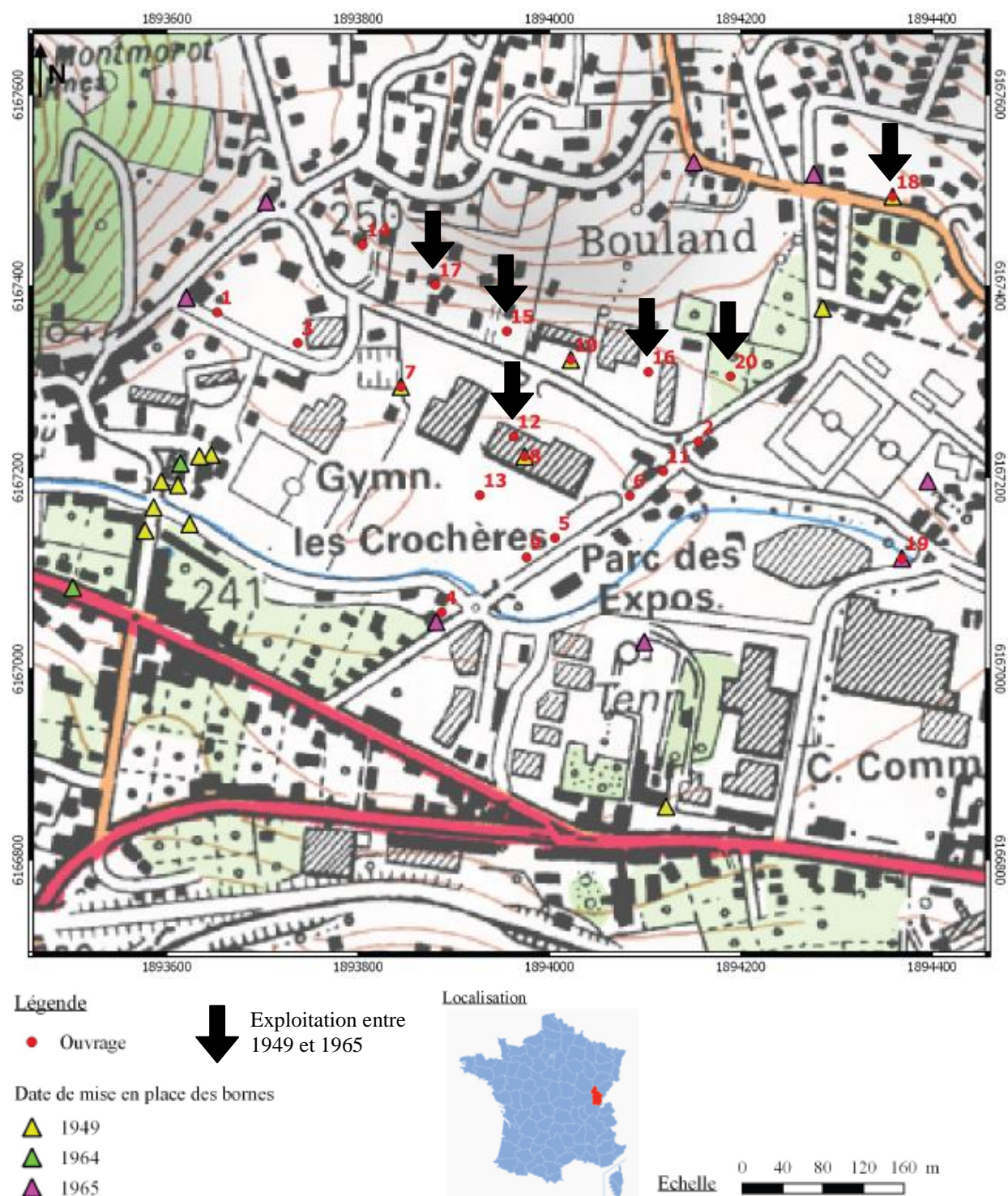


Figure E- 1 : Nivellement pendant l'exploitation industrielle

Le suivi de nivellement réalisé jusqu'en 1965 ne donne qu'une vision partielle des affaissements qui ont pu avoir lieu, peu de bornes étant situées au niveau du secteur d'exploitation.

Cependant l'INERIS a relevé les éléments suivants :

- La formation d'une cuvette d'affaissement centrée sur le sondage n°12, exploitée de 1924 à 1966 (Figure E- 2). L'amplitude de l'affaissement a été de l'ordre de 0,7 m, avec un rythme régulier légèrement supérieur à 4,5 cm par an pendant l'exploitation.

CONCESSION DE MINES DE SEL GEMME ET SOURCES SALEES DE MONTMOROT (Jura)
DÉCLARATION D'ARRÊT DEFINITIF DES TRAVAUX MINIERS
ET D'UTILISATION DES INSTALLATIONS ASSOCIEES

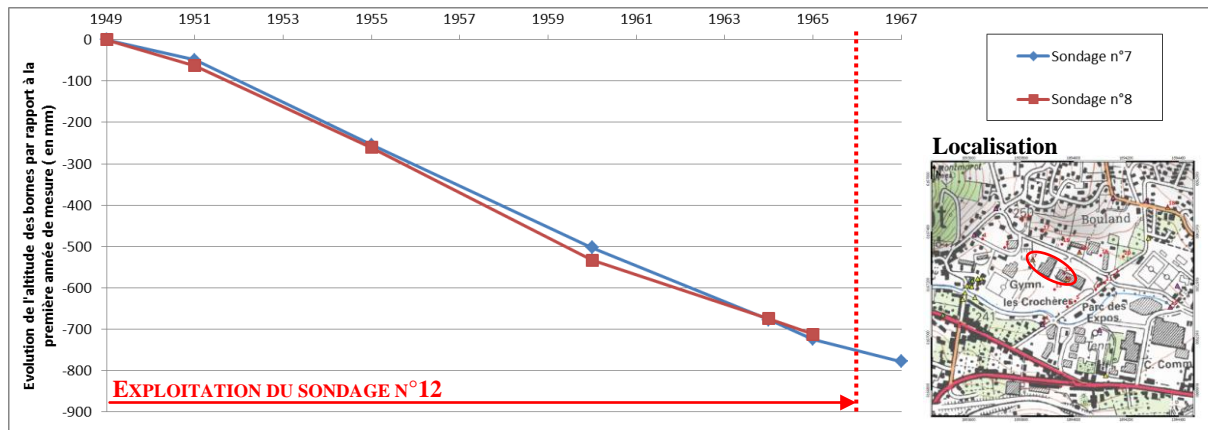


Figure E- 2 : Suivi de nivellement autour du sondage n°12

- Des affaissements qui se produisent dans l'environnement immédiat des points d'extraction, résultat d'une dissolution locale. Cela traduit une réalimentation locale en eau douce consécutivement aux pompages. Les apports en eau douce proviennent en toute logique des terrains aquifères sus-jacents et sont probablement contrôlés par le réseau de failles qui compartimentent les terrains.
- La simultanéité entre le pompage de saumure et la formation d'affaissement. Les mouvements de terrains étaient réguliers et sans effet retard. Cela traduit une réponse rapide des terrains de recouvrement par rapport à l'extraction du sel, et plaide dans le sens d'un comportement plutôt souple des terrains.

1.2.2. Mouvements observés par photographies aérienne

Sur les photographies aériennes de 1939 à 1966, on peut voir des marécages dans la zone située au sud de ligne formée par les sondages n°1, 3, 7, 8 et 6 et à l'ouest de la ligne formée par les sondages n° 4, 9, 5, 6, 11 et 2.

Un riverain a indiqué à CSME qu'il avait l'habitude de jouer dans ces marécages étant enfant, mais que ces derniers n'existaient pas dans la jeunesse de son père, né au début des années 1900. N'ayant pas de photographies aériennes antérieure à 1939 de disponibles, il est difficile de connaître précisément leur date d'apparition. On peut cependant avancer qu'ils sont apparus au cours de l'exploitation minière, traduisant ainsi des affaissements de surface dans une zone non couverte par les mesures de nivellement (Figure E- 3). Ils ont ensuite été masqués par le remblayage et le drainage de la zone.

Les affaissements révélés par la présence de marécages se situent sur une zone où il n'y a aucun sondage. On peut penser que la cuvette d'affaissement liée au sondage n°12, mise en évidence par les mesures de nivellement, s'étend vers le sud-ouest (Figure E- 4). La zone de marécage ne se serait alors développée que dans la partie la plus humide du secteur affaissée, du fait de la présence de nombreux canaux. Notons que la dissolution du sel est contrôlée par le pendage des couches, et que les points haut se trouvent au niveau des sondages n°1 et 4, ce qui est cohérent avec ce que nous observons.

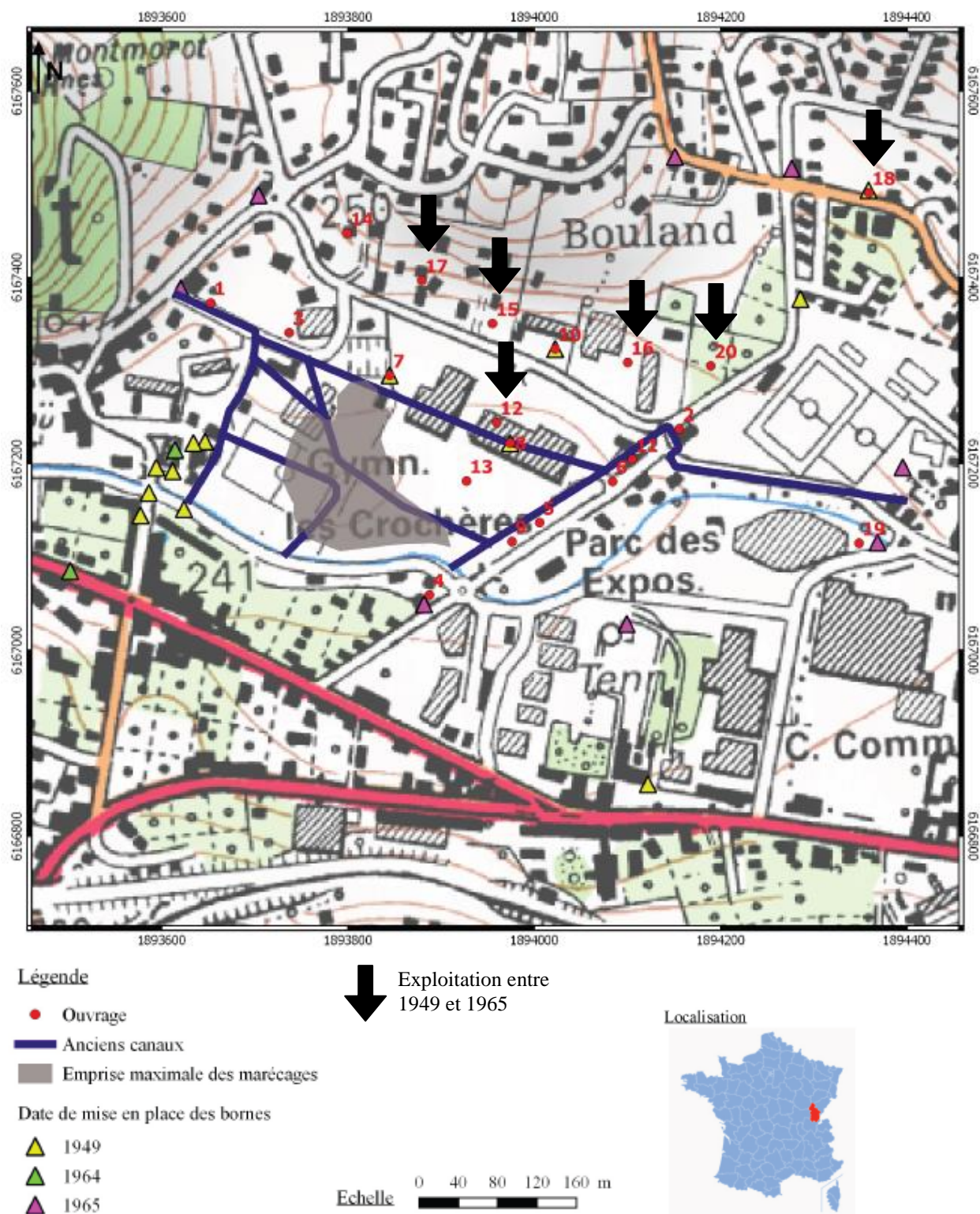


Figure E- 3 : Localisation de la zone de marécage par rapport aux bornes de nivellement

**CONCESSION DE MINES DE SEL GEMME ET SOURCES SALEES DE MONTMOROT (Jura)
DÉCLARATION D'ARRÊT DEFINITIF DES TRAVAUX MINIER
ET D'UTILISATION DES INSTALLATIONS ASSOCIEES**

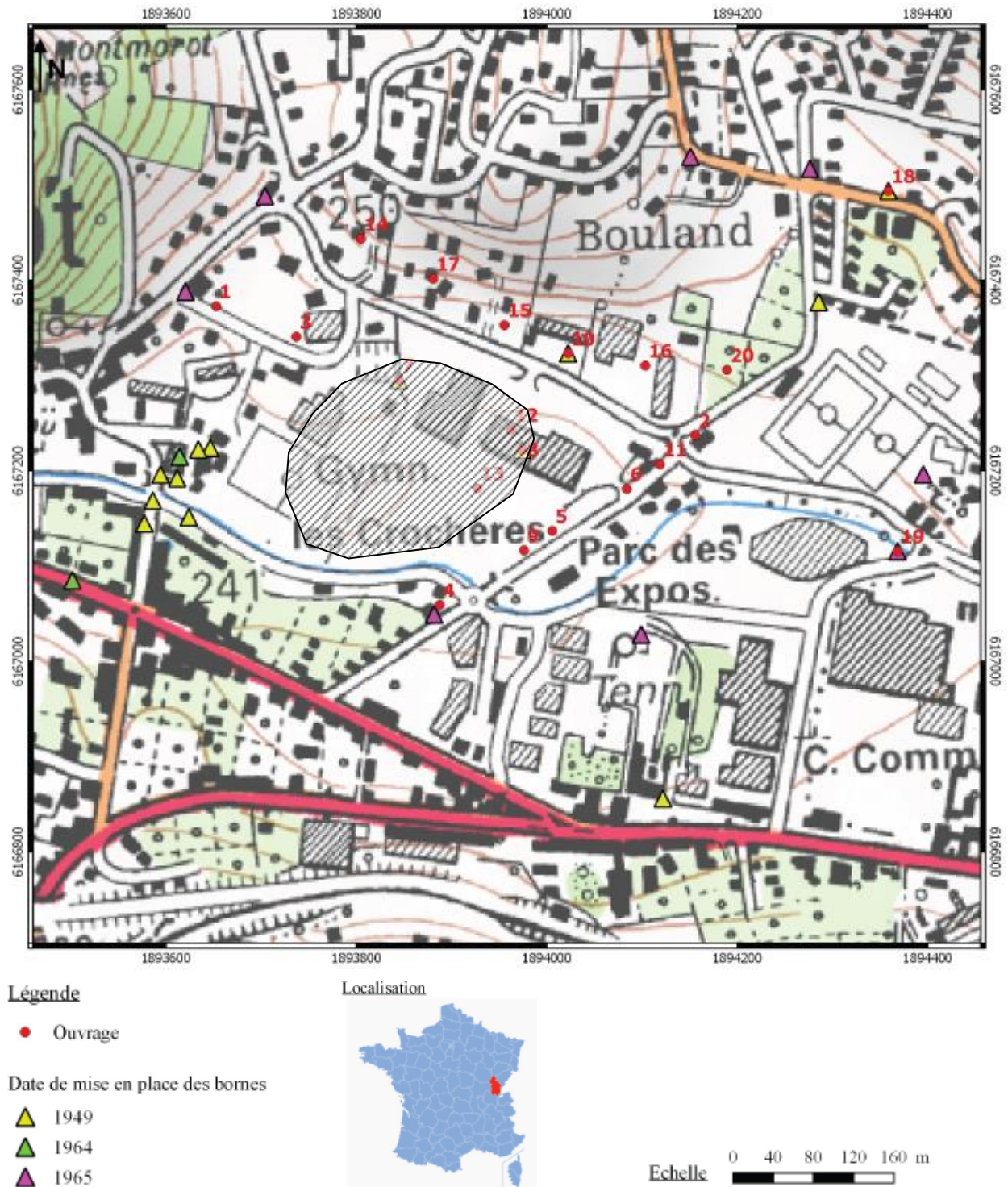


Figure E- 4 : Affaissement lié à l'exploitation du sondage n°12 et de ses voisins

2. Mouvements de terrain postérieurs à l'arrêt de l'activité industrielle

Les ouvrages miniers ont toujours été des points d'introduction d'eau douce. De ce fait, si des quantités significatives d'eau douce avaient été drainées par le sondage vers le gisement salifère postérieurement à l'arrêt de l'activité industrielle et que des phénomènes de dissolution avaient été provoqués, c'est autour de ces points que la dissolution du sel se serait produite, et donc que des mouvements de subsidence seraient apparus.

2.1. Entre 1966 et 2006

L'activité de la saline de Montmorot cessa en 1966. Avec l'arrêt de la saline, il y eut l'arrêt du pompage de saumure via les sondages. L'existence de sources salées anciennes traduit la présence d'une nappe salée naturelle dans le sous-sol de Montmorot. Considérant qu'une dissolution naturelle préexistait avant toute exploitation industrielle, il est vraisemblable que cette dernière existe encore maintenant. On peut alors considérer que la dissolution du gisement salifère n'a pas cessé avec la fin de l'exploitation.

Le réseau de nivellement a été étendu à l'arrêt de l'exploitation. En 1973, 11 bornes sont rajoutées, amenant le réseau à 40 bornes réparties sur l'ensemble du domaine exploité et s'étendant entre 200 et 300 m au-delà du champs d'exploitation. En 2004, 34 bornes de nivellement étaient encore actives, dont 6 du tout premier réseau.

Ci-dessous les conclusions de l'INERIS sur cette période :

- Dans le secteur des sondages 12 et 13, les mouvements de surface du sol se sont considérablement atténués (Figure E- 5). Les mesures faites sur les repères situés sur les puits 8 et 7 ont traduit pendant l'exploitation de cette zone un affaissement de l'ordre de 4,5 cm par an. Suite à l'arrêt de l'exploitation, le repère P qui est le point le plus proche des sondages 8 et 7, montre une tendance globale de poursuite de l'affaissement à un rythme de l'ordre de 3 mm/an.

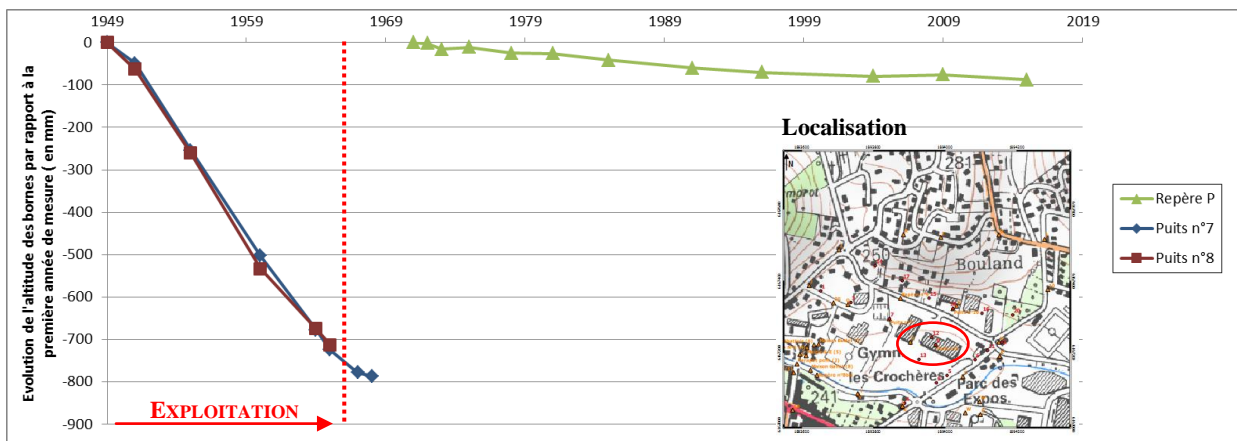


Figure E- 5 : Suivi de nivellement au niveau du secteur des sondages 7, 8, 12 et 13

- Plus globalement, sur l'ensemble du domaine suivi par le nivellement, on constate une tendance générale à l'affaissement des terrains oscillant entre 0,5 et 3 mm par an durant la période 1973 – 1991 (Figure E- 6), rythme diminuant légèrement au cours de la période 1991 – 2004 (Figure E- 7), partout inférieur à 2 mm par an avec plusieurs secteurs dans lesquels aucun mouvement n'a été constaté.

**CONCESSION DE MINES DE SEL GEMME ET SOURCES SALEES DE MONTMOROT (Jura)
DÉCLARATION D'ARRÊT DEFINITIF DES TRAVAUX MINERS
ET D'UTILISATION DES INSTALLATIONS ASSOCIEES**

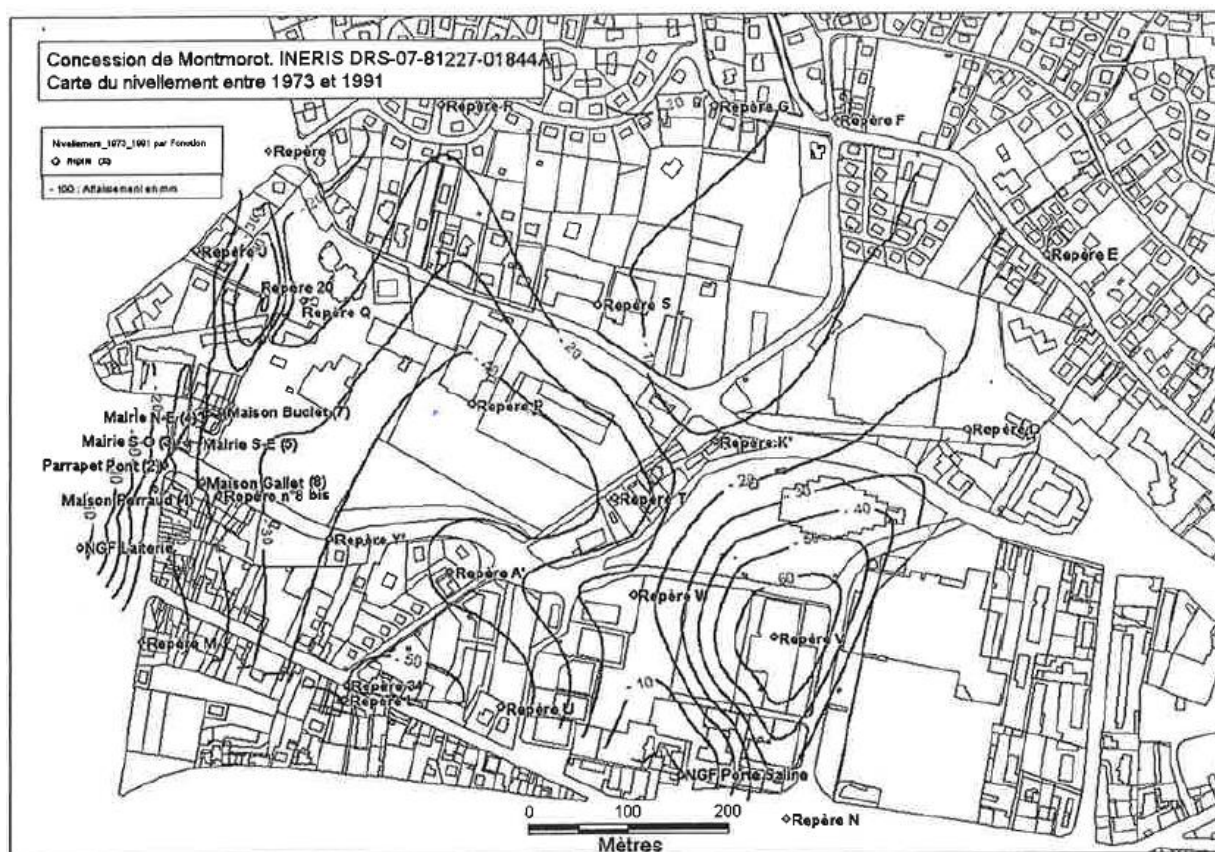


Figure E- 6 : Résultat du nivellement sur le secteur de Montmorot entre 1973 et 1991 (courbes d'iso valeurs en mm) - INERIS

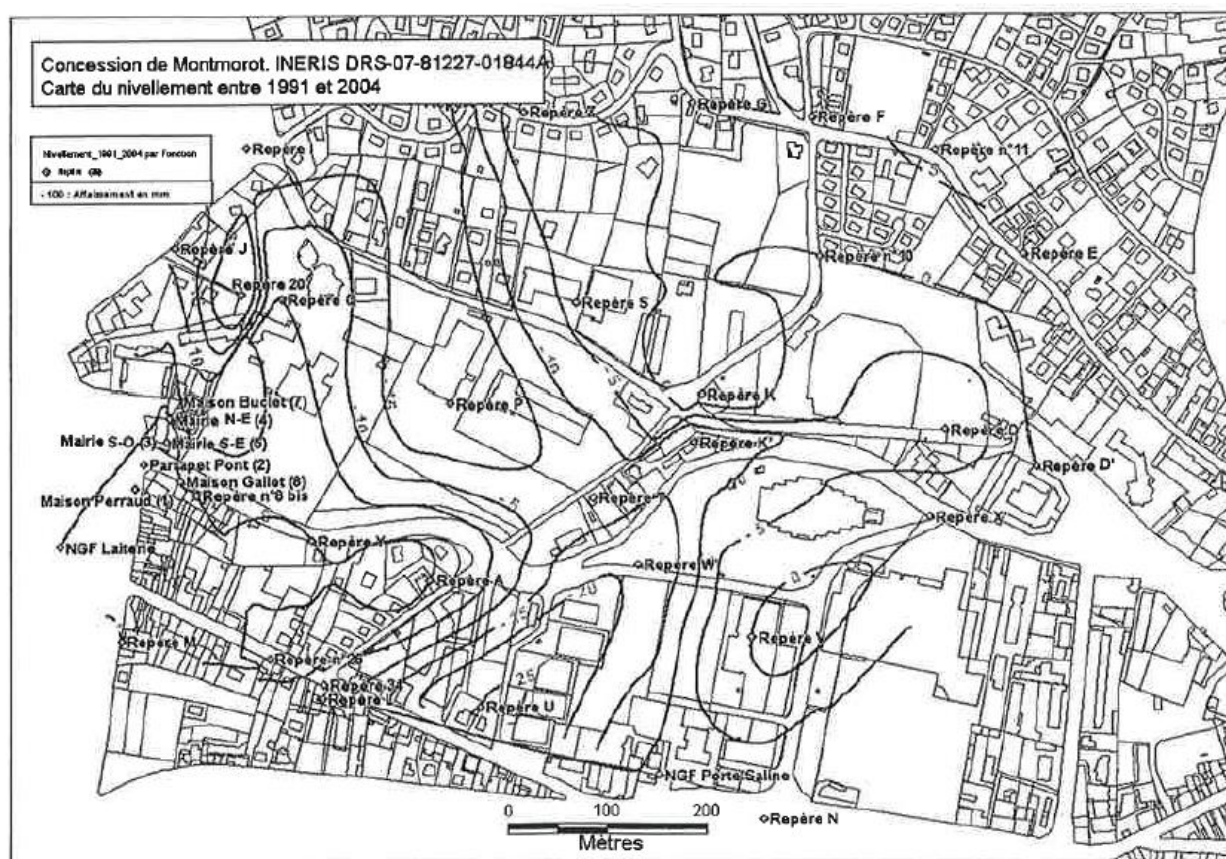


Figure E- 7 : Résultat du nivellement dur le secteur de Montmorot entre 1991 et 2004 (courbes d'iso valeurs en mm) - INERIS

- La comparaison de la Figure E- 6 et de la Figure E- 7 montre que les secteurs où les terrains s'affaissent fluctuent dans l'espace selon les périodes.

2.2. De 2006 à 2018

Deux campagnes de mesures ont été effectuées sur cette période, en 2009 et 2015. En 2015, 32 bornes étaient encore actives, dont 6 du tout premier réseau.

Sur l'ensemble du domaine suivi par le nivellement, on constate que le rythme d'affaissement diminue avec des terrains oscillant entre 0 et 1,2 mm par an (Figure E- 8). Plusieurs secteurs ne présentent aucun mouvement.

Plusieurs points de nivellement, situés au nord de l'ancienne zone d'exploitation, présentent une augmentation d'altitude pouvant aller jusqu'à 2,4 mm par an.

Comme relevé par l'INERIS dans son rapport de 2007, les secteurs où les terrains s'affaissent semblent fluctuer dans l'espace selon les périodes. Ceci est caractéristique d'une dissolution liée au fonctionnement d'une nappe salée. Des chenaux se créent et disparaissent au fil des dissolutions du sel, ce qui entraîne des mouvements de faibles amplitudes et dispersés dans l'espace. Ces mouvements ne semblent pas liés à l'exploitation par sondage réalisée par le passé.

**CONCESSION DE MINES DE SEL GEMME ET SOURCES SALEES DE MONTMOROT (Jura)
DÉCLARATION D'ARRÊT DEFINITIF DES TRAVAUX MINERS
ET D'UTILISATION DES INSTALLATIONS ASSOCIEES**

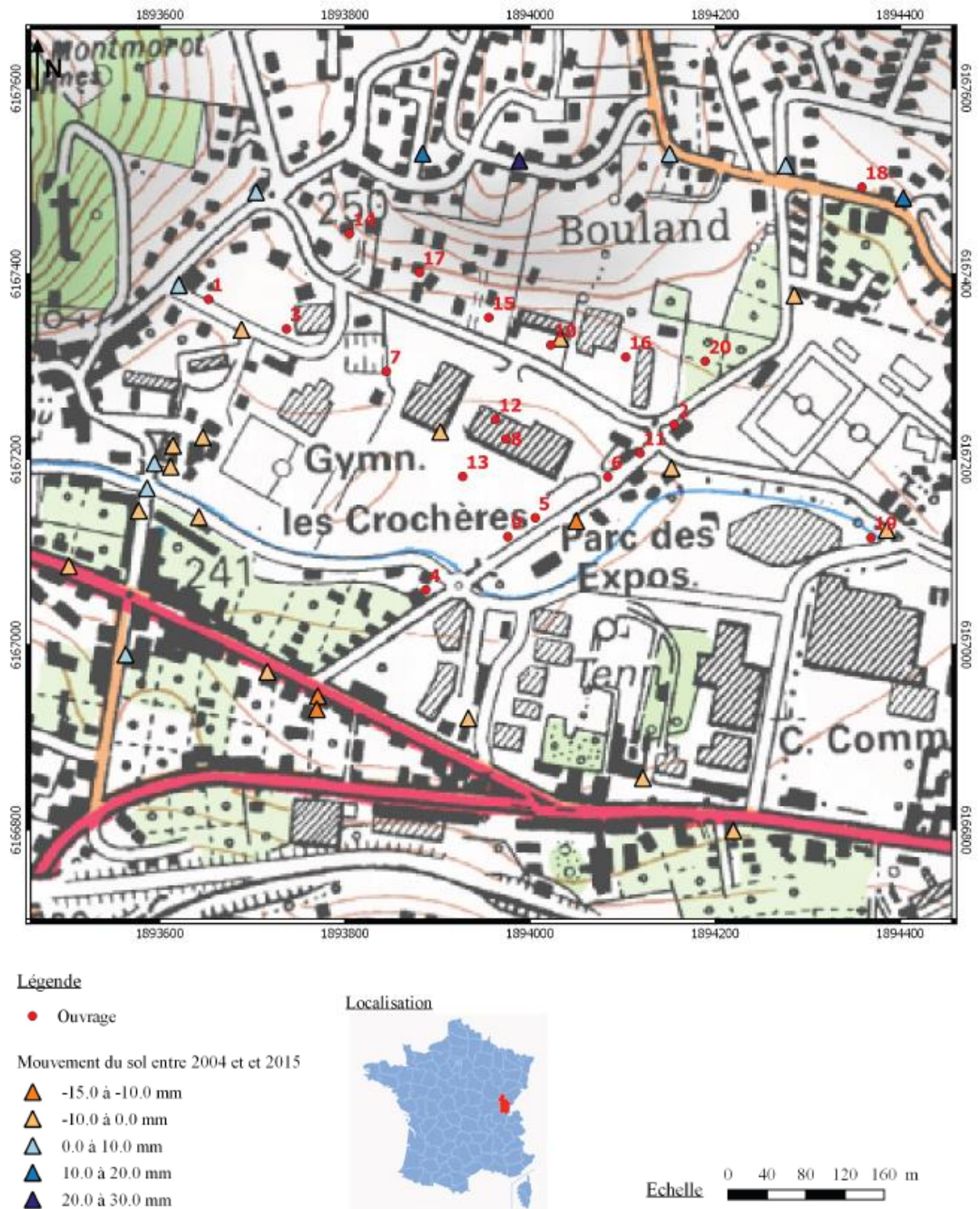


Figure E- 8 : Bilan du nivellement sur la période de 2006 à 2018

2.3. Conclusion

Suite à l'étude des données de nivellement de 1949 à 2004, l'INERIS conclut que suite à l'exploitation, le nivellement a mis en évidence un mouvement d'abaissement d'ensemble de la zone mais d'une amplitude très réduite par rapport à l'époque de l'exploitation. Ce mouvement correspondrait aux conséquences d'une dissolution naturelle telle qu'elle devait exister avant l'exploitation.

Les résultats de nivellement depuis 2004 étant dans la continuité des précédents, la conclusion amenée par l'INERIS reste valable aujourd'hui.

⇒ Les mouvements de subsidence observés actuellement dans le secteur de Montmorot correspondent aux conséquences d'une dissolution naturelle.

Au vu du nombre élevé de repères de nivellement, il n'a pas été jugé nécessaire d'étudier les données issues de l'interférométrie radar. Le coût important associé à l'obtention et au traitement de ces données en fait un outil à utiliser avec parcimonie dans les zones où la présence de mouvement est suspectée sans pouvoir être avérée par un manque de mesure terrain.

3. Impact de la méthode d'exploitation sur la stabilité des terrains

L'exploitation minière de la concession de MONTMOROT a été conduite par drainage d'eau douce des aquifères du sous-sol, provoquant ainsi la dissolution du sel au moins pour partie au pied des sondages. Le volume exploité peut aussi être appelé « volume déstructuré » pour mieux représenter le fait qu'il ne s'agit pas d'une cavité unique mais d'un ensemble de cavités comblées par des éléments foisonnés et remplies de saumure.

3.1. Eléments de réflexion sur la géométrie des vides souterrains

L'exploitation du sel à Montmorot s'est fait par pompage de saumure sans injection volontaire d'eau. Le sel a été mis en solution par l'intermédiaire des nappes rencontrées lors du forage. Ce mode d'exploitation au toit du sel n'est pas compatible avec la création de grandes cavités. D'après les renseignements trouvés dans les archives, le débit des puits était faible (quelques m³/h) et la teneur en NaCl de la saumure diminuait fortement lorsque l'on tentait d'accroître le débit pompé.

⇒ Ceci permet de conclure qu'il n'existait pas à la base des sondages de cavités formant un réservoir de saumure suffisamment grand pour permettre une extraction de saumure saturée à un débit important.

Il est à souligner que les mêmes observations ont été réalisées aux sondages de la concession SAINT-NICOLAS (Meurthe et Moselle) et que la note technique de synthèse rédigée en 1942 pour cette exploitation conclut qu'il ne doit pas exister de grandes cavités à la base des sondages.

3.2. Evaluation du volume déstructuré

Le suivi de nivellement réalisé de 1949 à 1966 met en évidence des affaissements se produisant dans l'environnement immédiat des points d'extraction. Cela signifie que le sel extrait provenait d'une dissolution au pied du sondage, entraînant la formation de cavités dont nous allons évaluer la taille.

3.2.1. Eléments de géométrie et hypothèse de calcul

Le volume déstructuré par l'exploitation, ainsi que la géométrie de cette enveloppe, peuvent être évalués à partir des données d'exploitation et des hypothèses suivantes :

- La teneur moyenne du gisement « sel gemme / marnes salées » est estimé à 75% de NaCl (teneur en volume proche de la teneur en masse) ;
- L'enveloppe déstructurée a une géométrie conique dont la surface de base est superposée au toit du gisement, supposé horizontal par simplification, et dont le sommet est situé deux mètres environ sous le bas du tube d'aspiration ;

- Quand elles étaient disponibles, les données d'archive sur la profondeur initiale du bas du tube d'aspiration ont été utilisées. C'est le cas des sondages n°3, 5, 6, 7, 8, 9, 10 et 20.
- Pour les autres sondages (1, 2, 4, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17 et 18), une valeur de 10 mètres sous le toit du sel a été retenue comme profondeur initiale du bas du tube d'aspiration. Un rapport datant de 1845 rédigé par l'ingénieur des mines donne cette valeur.

Les éléments de géométrie de cette enveloppe déstructurée par l'exploitation sont présentés sur la Figure E- 9.

Il est à noter que la forme exacte de ces cavités reste inconnue mais, en supposant que les couches de sel sont horizontales, il est logique de retenir une géométrie conique. Cette géométrie tient compte du fait que la dissolution du sel est plus importante à l'axe du sondage et diminue au fur et à mesure que l'on s'en éloigne.

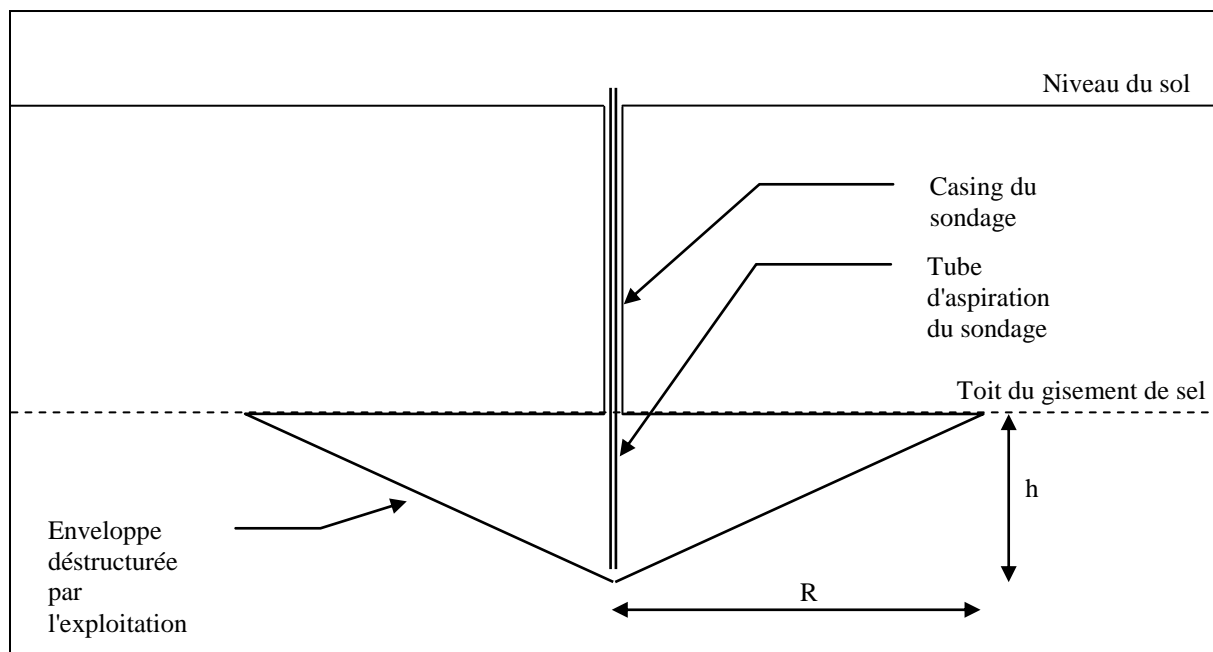


Figure E- 9 : Eléments de géométrie de l'enveloppe déstructurée

3.2.2. Calcul du rayon de l'enveloppe déstructurée pour chaque sondage

Le volume de l'enveloppe déstructurée est donné par la formule : $V = \frac{\pi R^2 h}{3}$

Le rayon de cette enveloppe est donc : $R = \sqrt{\frac{3V}{\pi h}}$ (1)

Soit P la production de sel d'un sondage, on a : $P = T \times d \times t \times V$

Avec T : teneur du gisement

d : densité du sel (2,16)

V : Volume de sel dissout

t : taux de récupération (ici 90%)

Ou : $V = \frac{P}{T \times 2,16 \times 0,9}$

En remplaçant V dans la relation (1), on en déduit :

$$R = \sqrt{\frac{3 \times P}{\pi h \times T \times 2,16 \times 0,9}}$$

Soit avec T= 75% de NaCl, $R = \sqrt{\frac{3 \times P}{\pi h \times 1,46}}$

Le rayon de l'enveloppe conique déstructurée a ainsi été calculé pour chacun des vingt sondages exploités. Les résultats sont présentés dans le Tableau E- 1 ci-dessous :

Sondage	Production ¹ (T)	Hauteur du cône ² (m)	Rayon du cône (m)
1	42 000	12	48
2	135 981	12	86
3	158 162	14	86
4	138 874	12	87
5	142 732	27	59
6	65 580	37	34
7	158 162	15	82
8	146 590	43	47
9	177 993	28	64
10	219 993	50	53
11	70 407	12	62
12	235 001	12	113
13	136 976	12	86
14	78 358	12	65
15	84 000	12	68
16	109 810	12	77
17	71 828	12	63
18	90 310	12	70
19			
20	48 310	34	31

Tableau E- 1 : Rayon de l'enveloppe conique déstructurée des sondages exploités

Au vu des rayons de cône obtenus et de la distance entre les sondages, il est à noter que les cônes se superposent.

Le rapport du subdivisionnaire des mines, daté du 24 février 1929, et traitant de la mise en exploitation des sondages 11, 12 et 13 fait le constat suivant :

« Le sondage n°11 a traversé, dès le haut, des terrains très dérangés. Il a été carotté à partir de 130 m. Aucun des bancs n'est horizontal et certaines couches de sel sont même verticales. Le degré de salure de son eau est resté très longtemps à un chiffre insuffisant (13°B), mais il atteint maintenant 24°B. »

Le sondage n°11 se situe dans l'emprise estimée du cône de dissolution du sondage n°2. Les observations d'exploitation sont ainsi cohérentes avec les calculs effectués.

¹ Voir document B pour le détail de l'estimation.

² Hypothèse de calcul.

**CONCESSION DE MINES DE SEL GEMME ET SOURCES SALEES DE MONTMOROT (Jura)
DÉCLARATION D'ARRÊT DEFINITIF DES TRAVAUX MINERS
ET D'UTILISATION DES INSTALLATIONS ASSOCIEES**

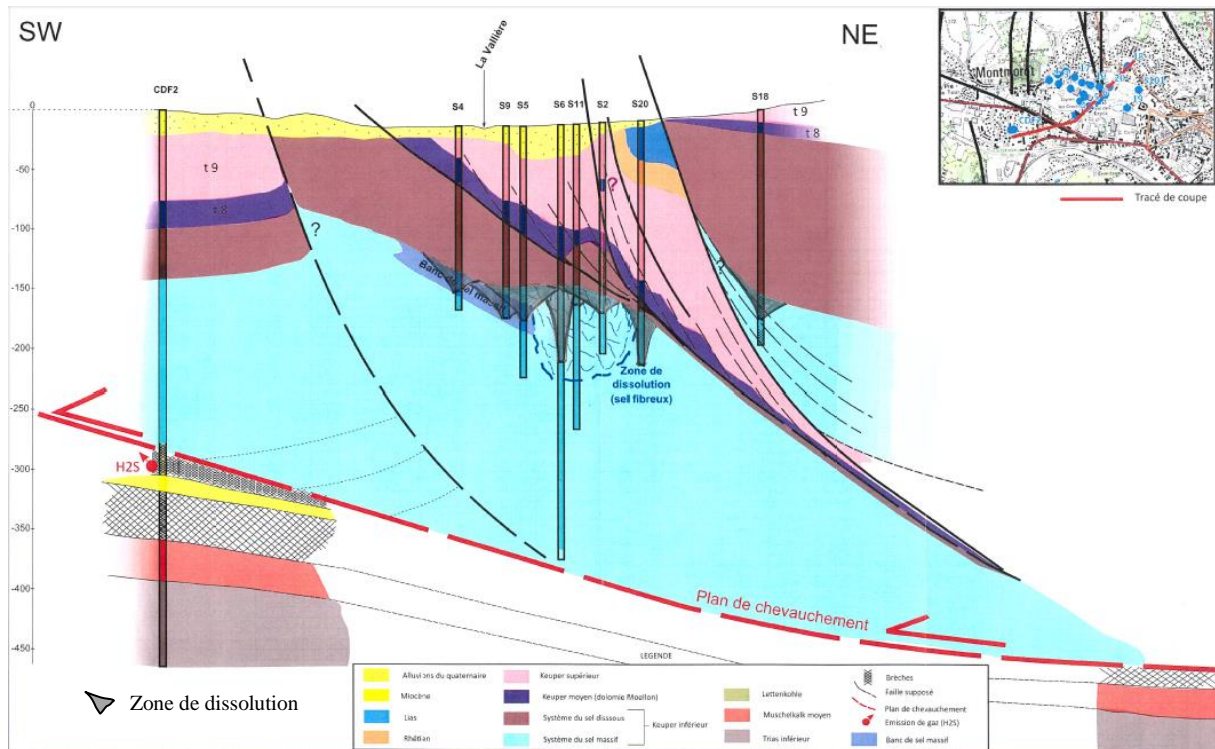


Figure E- 10 : Coupe de l'extension de la dissolution liée à l'exploitation des sondages

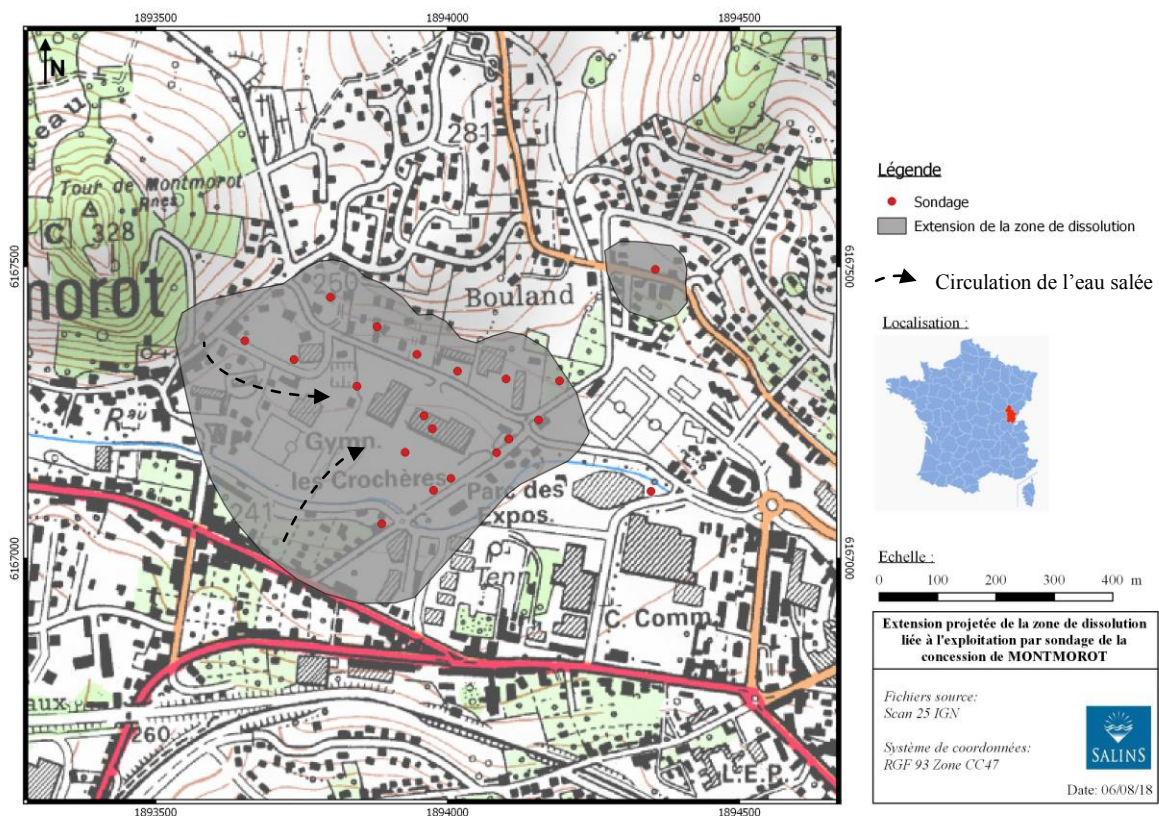


Figure E- 11 : Extension horizontale projetée de la dissolution liée à l'exploitation par sondage

3.3. Mécanismes de fermeture des vides souterrains

Du fait de la méthode d'exploitation utilisée dans la concession de MONTMOROT, la dissolution du sel s'est effectuée au pied des sondages d'exploitation. Celle-ci a généré des

vides dans le sous-sol. Le diamètre des volumes déstructurés interconnectés ne permet pas de conserver des cavités stables dans le sous-sol.

Dans ce type d'exploitation, trois hypothèses permettent d'expliquer comment une cavité saline est susceptible de se refermer au fur et à mesure de sa création :

- par foisonnement des insolubles du gisement de sel,
- par convergence de la voûte et subsidence des terrains de surface,
- par effondrement de la voûte et foisonnement des éléments effondrés.

3.3.1. Foisonnement des insolubles contenus dans le gisement salifère

Par définition, les insolubles sont les éléments non solubles présents dans le gisement de sel, constitués essentiellement par des phases minérales argileuses et des sulfates (sulfates de calcium). La teneur moyenne des insolubles retenue dans le gîte est de 25%.

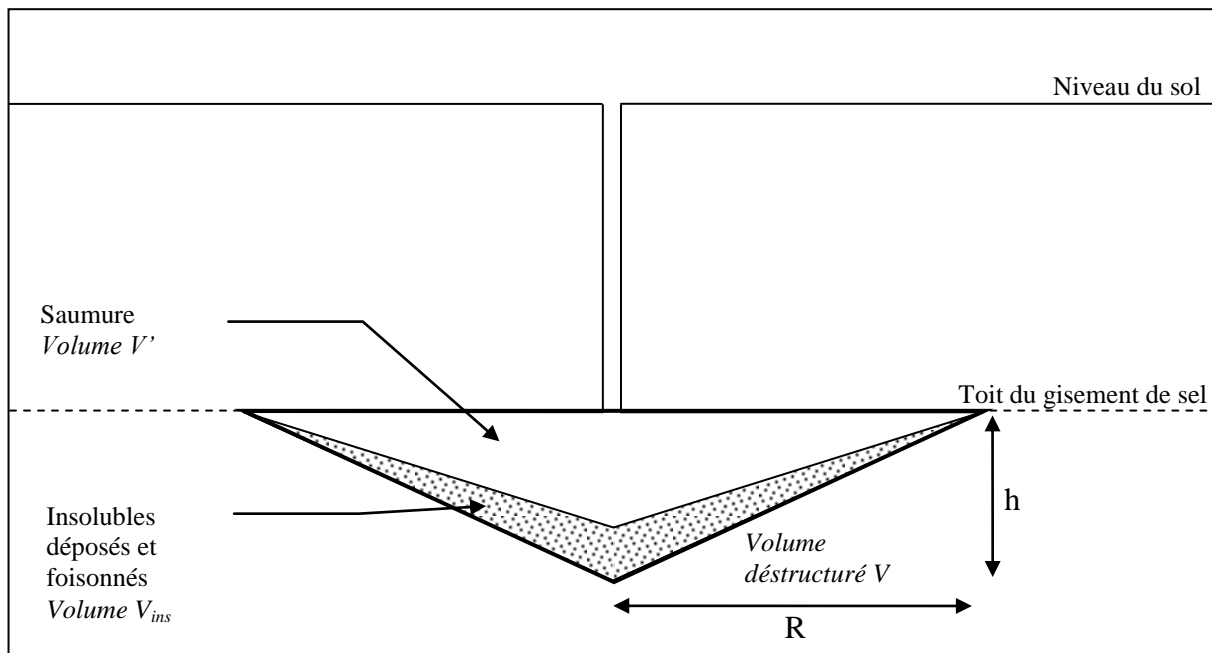


Figure E - 1 : Foisonnement des insolubles

Pendant l'exploitation, le sel est dissout en place et forme de la saumure qui est pompée jusqu'à la surface. Les matières insolubles elles, restent dans la cavité et sédimentent en prenant plus de place qu'à l'origine : cette augmentation de volume constitue ce que l'on appelle le « foisonnement ». On appelle k le coefficient de foisonnement, c'est-à-dire le rapport entre le volume final sur le volume initial.

Le volume de cavité correspondant au volume déstructuré par l'exploitation est assimilé à un cône :

$$V = \frac{\pi R^2 h}{3}$$

Le volume des insolubles déposés au fond de la cavité peut être évalué en considérant un coefficient de foisonnement k :

$$V_{ins} = k \times (0,25 \times V)$$

3.3.2. Convergence de la voûte et subsidence des terrains de recouvrement

Des phénomènes de subsidences ont été observés durant l'exploitation via le réseau de nivellement mis en place à partir de 1949. Notamment, un affaissement de l'ordre de 0,7 m a

été mesuré au niveau du sondage n°12 entre 1949 et 1966, avec un rythme régulier légèrement supérieur à 4,5 cm/an. Sur cette période la production estimée du sondage n°12 est de 96 310 tonnes de sel, soit un volume de vide créé de 67 497 m³. Ainsi une subsidence de 10,4 µm par m³ de vide créé a été observée au niveau du sondage n°12.

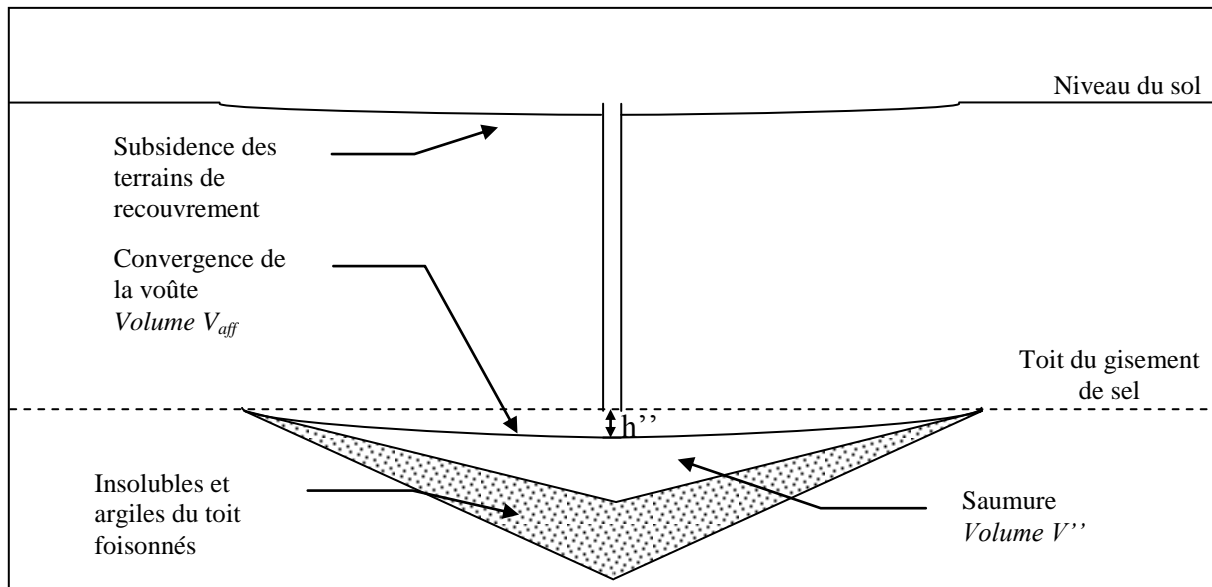


Figure E- 12 : Convergence de la voûte

L'amplitude de la convergence de la voûte est exagérée sur le schéma dans le but d'une meilleure lisibilité

On a :

$$V' = V_{\text{aff}} + V'' \quad \text{et} \quad V_{\text{aff}} = \frac{2}{3} \pi h'' R^2$$

Les phénomènes de convergence de voûte et de subsidence des terrains de recouvrement ont existé à Montmorot. La simultanéité entre le pompage de saumure et la formation de l'affaissement traduit un comportement souple des terrains. Le banc de dolomie d'une dizaine de mètre présent dans le sous-sol ne forme pas un banc raide permettant la mise en place et la conservation de grandes cavités dans le sous-sol. Dans le contexte jurassien, ce banc est probablement fracturé, ce qui lui enlève toute sa rigidité.

⇒ On peut conclure que la convergence de la voûte a participé à la fermeture des cavités, entraînant ainsi la subsidence des terrains de recouvrement.

3.3.3. Effondrement ou fléchissement du toit immédiat des vides souterrains

Ci-dessous la série stratigraphique locale décrite par COLLIN et LIENHARDT en 1972.

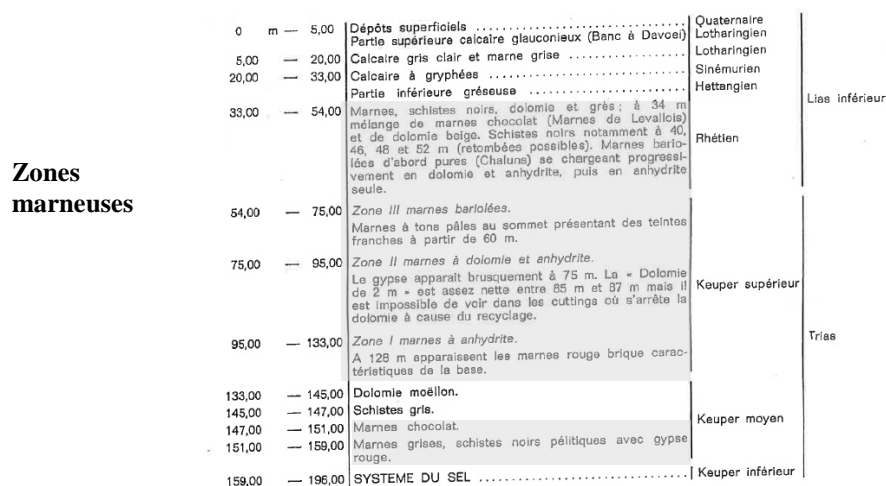


Figure E- 13 : Lithostratigraphie locale de Montmorot – Coupe du sondage 20
(COLLIN et LIENHARDT, 1972)

Au toit du gisement de sel de Montmorot, on trouve des bancs de marne. Ces bancs ne sont pas suffisamment compétent pour supporter leur propre poids sur une grande portée, et il est fort probable qu'ils se soient effondrés au cours de la dissolution et soient tombés dans la cavité au fur et à mesure de l'exploitation.

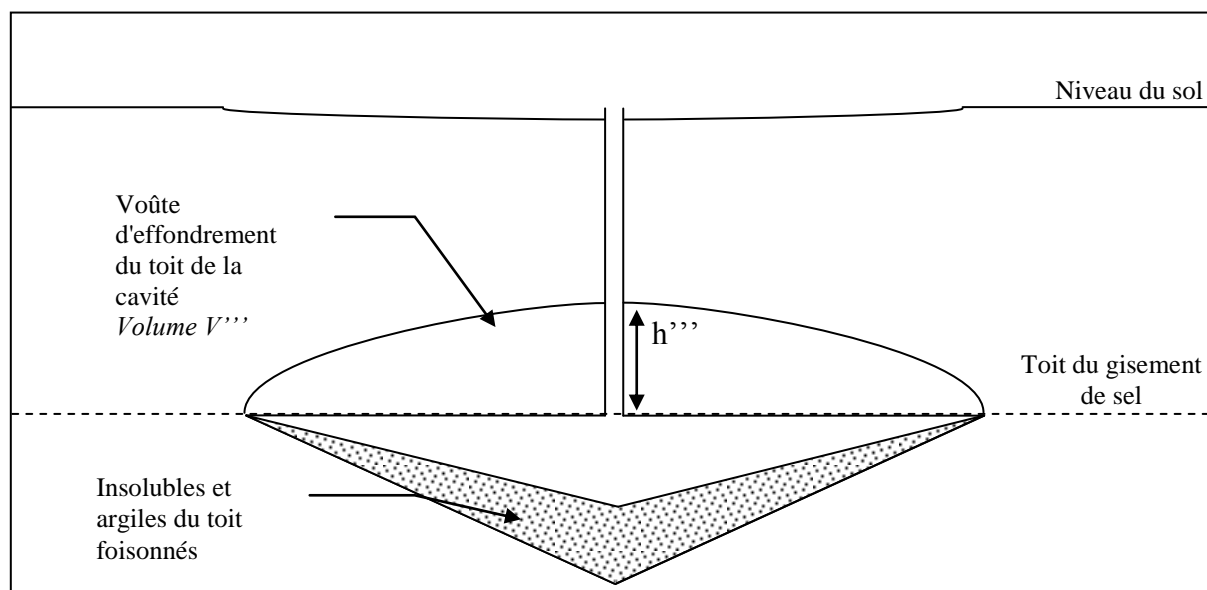


Figure E - 2 : Effondrement du toit de la cavité

3.4. Mécanismes retenus

Quatre étapes successives peuvent être retenues dans le cas des cavités de la concession de MONTMOROT :

- Etape 1 : création de la cavité par dissolution in situ au pied du sondage d'exploitation.
- Etape 2 : dépôt des phases insolubles du gisement foisonnées dans la cavité.
- Etape 3 : convergence de la voûte et subsidence des terrains de recouvrement.
- Etape 4 : rupture locale du toit de la cavité et dépôt des bancs rompus foisonnés jusqu'à ce que la cavité soit complètement comblée.

En réalité ces quatre phénomènes sont simultanés.

CONCESSION DE MINES DE SEL GEMME ET SOURCES SALEES DE MONTMOROT (Jura)
DÉCLARATION D'ARRÊT DEFINITIF DES TRAVAUX MINIER
ET D'UTILISATION DES INSTALLATIONS ASSOCIEES

3.4.1. Calcul du volume de vide résiduel suite au remplissage de la cavité par le foisonnement des insolubles

Les matières insolubles présentes dans les couches de sel du gîte ne sont pas dissoutes lors de la création de la cavité et se déposent par gravité dans la cavité. Le phénomène de foisonnement conduit à augmenter la volume initial des matériaux insolubles dans la cavité et la remplit partiellement.

Connaissant la production de sel sur chaque sondage, il est possible d'évaluer le volume V' de vide résiduel suite au dépôt des insolubles. Le Tableau E - 1 présente les résultats du calcul du volume résiduel des cavités (vide résiduel) en prenant comme hypothèse une teneur moyenne des insolubles dans le gîte de 25% et en faisant varier k entre 1,2 et 1,4.

Sondage	Volume exploité « enveloppe déstructurée » (en m ³)	Volume de vide résiduel ³ V' en fonction de k (en m ³)		
		k = 1,2	k = 1,3	k = 1,4
S1	28 807	20 165	19 444	18 724
S2	93 265	65 286	62 954	60 623
S3	108 479	75 935	73 223	70 511
S4	95 250	66 675	64 294	61 912
S5	97 896	68 527	66 080	63 632
S6	44 979	31 486	30 361	29 237
S7	108 479	75 935	73 223	70 511
S8	100 542	70 379	67 866	65 352
S9	122 080	85 456	82 404	79 352
S10	150 887	105 621	101 849	98 076
S11	48 290	33 803	32 596	31 389
S12	161 180	112 826	108 797	104 767
S13	93 948	65 764	63 415	61 066
S14	53 743	37 620	36 277	34 933
S15	57 613	40 329	38 889	37 449
S16	75 316	52 721	50 838	48 955
S17	49 265	34 485	33 254	32 022
S18	61 941	43 359	41 810	40 262
S19				
S20	33 134	23 194	22 366	21 537

Tableau E - 1 : Volume de remplissage des cavités par les insolubles et détermination du volume de vide résiduel suivant le coefficient de foisonnement k

Le foisonnement des insolubles contenus dans le gisement réduit le volume de vide résiduel à 65-70% de l'enveloppe déstructurée en fonction du coefficient de foisonnement retenu.

3.4.2. Calcul du volume de vide résiduel suite à la convergence de la voûte et à la subsidence des terrains de surface

D'après les observations faites au niveau du sondage n°12, on émet comme hypothèse que pour 1 m³ de vide créé, les terrains s'affaissent de 10,4 µm au droit du sondage. Cela nous permet de déterminer la hauteur h'' de convergence de la voûte, et par la suite le volume de

³ V' = V – Vins

Soit avec la relation (4) : V' = V × (1 - 0,25 × k)

vide résiduel V'' . Le Tableau E- 2 présente ces résultats pour les trois coefficients de foisonnement étudiés.

Sondage	Volume exploité « enveloppe déstructurée » (en m ³)	Volume de vide résiduel ⁴ V'' en fonction de k (en m ³)		
		k = 1,2	k = 1,3	k = 1,4
S1	28 807	18 726	18 006	17 286
S2	93 265	50 209	47 877	45 545
S3	108 479	58 389	55 677	52 965
S4	95 250	50 949	48 568	46 187
S5	97 896	61 036	58 589	56 141
S6	44 979	30 336	29 212	28 087
S7	108 479	60 010	57 298	54 586
S8	100 542	65 507	62 993	60 479
S9	122 080	74 409	71 357	68 305
S10	150 887	96 221	92 449	88 677
S11	48 290	29 761	28 554	27 347
S12	161 180	67 796	63 766	59 737
S13	93 948	50 465	48 116	45 767
S14	53 743	32 614	31 270	29 927
S15	57 613	34 576	33 135	31 695
S16	75 316	42 889	41 006	39 123
S17	49 265	30 278	29 047	27 815
S18	61 941	36 708	35 160	33 611
S19				
S20	33 134	22 514	21 686	20 857

Tableau E- 2 : Détermination du volume de vide résiduel suivant le coefficient de foisonnement k à la suite de la subsidence des terrains de surface

Le foisonnement des insolubles contenus dans le gisement combiné à la convergence de la voûte réduit le volume de vide résiduel de 37 à 67 % de l'enveloppe déstructurée en fonction du coefficient de foisonnement retenu.

3.4.3. Calcul de la hauteur de la voûte créée suite à la rupture du toit de la cavité et du comblement total de cette dernière

Si l'on considère que les bancs du toit de la cavité qui se rompent se déposent dans la cavité avec un coefficient de foisonnement k, la cavité sera totalement comblée lorsque :

$$V'' + V_{\text{aff}} + V''' = k \times (V''' + V_{\text{aff}})$$

Soit :

$$V''' = \frac{V''}{k-1} - V_{\text{aff}} \quad (2)$$

Or,

$$^4 V'' = V' - \frac{2}{3} \pi h'' R^2$$

CONCESSION DE MINES DE SEL GEMME ET SOURCES SALEES DE MONTMOROT (Jura)
DÉCLARATION D'ARRÊT DEFINITIF DES TRAVAUX MINIERS
ET D'UTILISATION DES INSTALLATIONS ASSOCIEES

$$V' = V'' + V_{\text{aff}} \text{ et } V' = (1 - 0,25 \times k) \times V$$

$$\text{D'où : } V'' = V' - (1 - 0,25 \times k) \times V \quad (3)$$

En prenant l'hypothèse que la forme de la voûte effondrée est celle d'une parabole, on alors :

$$V''' = \frac{2}{3} \pi h''' R^2 \quad (4)$$

La relation (2) s'écrit donc, avec les relations (3) et (4):

$$\frac{2}{3} \pi h''' R^2 = \frac{V' - (1 - 0,25 \times k)V}{k - 1} - V_{\text{aff}}$$

et on en déduit :

$$h''' = \frac{3}{2\pi R^2} \times \left(\frac{V' - (1 - 0,25 \times k)V}{k - 1} - V_{\text{aff}} \right)$$

Les résultats des calculs sont présentés dans le Tableau E- 3 ci-dessous :

Sondage	Profondeur du toit du sel (m)	Hauteur de la voûte (en m)			Profondeur du toit de la voûte (en m)			Profondeur du mur de la Dolomie (en m)
		k = 1,2	k = 1,3	k = 1,4	k = 1,2	k = 1,3	k = 1,4	
S1	128,81	19	18	18	110	110	111	82
S2	124,75	15	14	14	110	110	111	58
S3	126,26	18	17	16	109	109	110	41
S4	121,00	15	14	14	106	107	107	38
S5	133,88	40	39	37	93	95	97	81
S6	132,19	61	59	57	71	73	76	102
S7	100,98	20	19	18	81	82	83	
S8	114	69	67	64	45	47	50	86
S9	134,20	41	40	38	93	94	96	72
S10	156,90	79	76	72	78	81	84	146
S11	134	18	17	16	116	117	118	102
S12	114,05	11	10	9	103	104	105	79
S13	135,30	15	14	14	120	121	122	44
S14	147,50	18	17	16	130	131	131	
S15	154,25	17	17	16	137	138	138	145
S16	165,40	16	16	15	149	150	151	154
S17	152,05	18	17	16	134	135	136	140
S18	152,90	17	16	16	136	137	137	18
S19	145							
S20	159	57	55	52	102	104	107	145

Tableau E- 3 : Eléments de géométrie de la voûte d'effondrement du toit des cavités

Il est à noter que la plupart des voûtes n'atteignent pas le niveau de dolomie moellon. Comme expliqué au paragraphe 3.3.2, ce banc est probablement fracturé et ne forme pas un banc raide. Les voûtes d'effondrement peuvent donc se propager au-delà.

3.5. Conclusions

L'étude de stabilité a montré que l'exploitation du sel dans la concession de MONTMOROT n'a pas induit la formation de grandes cavités dans le sous-sol.

La hauteur moyenne du sel exploité est de 19 m et sur la base des données de production reconstituées, les calculs montrent que le rayon de l'enveloppe déstructurée au niveau des sondages d'exploitation varie entre 31 et 113 m.

Trois mécanismes sont en jeu après la formation de la chambre de dissolution :

- Les insolubles se déposent gravitairement au fond de la cavité au fur et à mesure de la dissolution et en remplissent une partie.
- Par la suite, après avoir atteint le toit du sel et lorsque la cavité s'élargit (extension horizontale de la dissolution), la voûte commence à converger, ce qui est accompagné par un tassement des terrains en surface.
- Enfin, les terrains marneux et argileux se délitent. Ils viennent alors combler le vide résiduel. Le toit de la cavité remonte alors dans les terrains supérieurs jusqu'à ce que le vide soit complètement rempli. Cette remontée de toit est en moyenne de 30 m quand on se place dans le cas le plus défavorable ($k=1,2$).

Aucune de ces voûtes d'éboulement n'a atteint la surface.

4. Description des mouvements de terrain résiduels envisageables

4.1. Bilan des vides résiduels dans le sous-sol

Nous avons fait l'hypothèse de cavités coniques à toit horizontal, ce qui n'est pas le cas dans l'environnement géologique de l'exploitation de la concession de MONTMOROT. Ceci étant, les épaisseurs affectées par l'exploitation sont peu dépendantes de l'extension horizontale, cette hypothèse de calcul peut donc raisonnablement être faite.

Les calculs ont montré qu'au terme de l'exploitation, le remplissage des cavités par les matières insolubles en réduisait le volume de 65 à 70%. En complément, la convergence de la voûte et l'effondrement du toit immédiat des cavités de dissolution ont provoqué le comblement du vide résiduel. Ainsi, ces trois mécanismes ont provoqué un auto comblement total des cavités sur l'ensemble des sondages d'exploitation.

Il n'existe pas de vide résiduel significatif dans le sous-sol, si ce n'est les sondages en eux-mêmes, du niveau du sol au toit de la voûte d'effondrement.

Il est à noter que dans certains sites de Lorraine ne présentant pas de circulation naturelle de saumure, l'exploitation du sel au toit du gisement avec injection d'eau, telle qu'elle a été pratiquée dans la concession de MONTMOROT, a conduit à des mouvements de subsidence lents ou à des affaissements rapides mais sans rupture de la continuité de la topographie (formation de cuvettes, jamais de cratères). Lorsqu'ils ont eu lieu, ces mouvements ont commencé durant l'exploitation et ont cessé dans les quelques années ayant suivi l'arrêt de l'exploitation. Il peut donc être avancé que tous les mouvements de terrain qui auraient pu se produire, consécutivement à l'exploitation du sel, dans la concession de MONTMOROT, auraient déjà dû être terminés depuis longtemps puisque l'exploitation industrielle des sondages a cessé en 1966.

- ⇒ L'exploitation du sel par les sondages de la concession de MONTMOROT n'a donc pas généré d'aléa de mouvement de terrain significatifs à moyen ou long terme.

4.2. Mouvements de terrain de surface envisageables

En l'absence de vides résiduels dans le sous-sol résultant de l'exploitation passée, aucun mouvement résultant de la fermeture des cavités ou de la poursuite de la dissolution provoquée par le pompage de saumure n'est à envisager. Seule la dissolution naturelle qui se poursuit génère des mouvements de subsidence localisés d'amplitude millimétrique.

Des cuvettes d'affaissement rapides relativement peu profondes et de quelques mètres de diamètre pourraient se créer si les têtes des sondages venaient à s'effondrer. Cet aléa ne présenterait un risque pour la sécurité des personnes et des animaux que si cet effondrement localisé avait lieu dans un lieu de circulation, ce qui est le cas pour tous les sondages de la concession.