

**Compagnie des Salins du Midi et des Salines de l'Est**  
**Développement de deux nouvelles cavités d'exploitation par**  
**dissolution dans le champ de Saint Pandelon**

---

**Faouzi HADJ-HASSEN**

**Octobre 2020**

**Référence R201006FHAD**

## **S O M M A I R E**

<b>1. INTRODUCTION.....</b>	<b>3</b>
<b>2. DONNEES GENERALES DU SITE .....</b>	<b>3</b>
2.1 Historique de l'exploitation .....	3
2.2 Caractéristiques géotechniques des terrains .....	4
2.3 Conditions de stabilité des cavités actuelles .....	6
2.4 Géométrie des nouvelles cavités .....	7
<b>3. MODELISATION DE LA STABILITE DES NOUVELLES CAVITES.....</b>	<b>8</b>
3.1 Méthodologie suivie .....	8
3.2 Analyse de la stabilité .....	9
<b>4. CONCLUSION .....</b>	<b>14</b>

## **1. INTRODUCTION**

La Compagnie des Salins du Midi et des Salines de l'Est exploite au sud de Dax à St Pandelon (Landes) depuis 1965 une série de cinq cavités de dissolution dans un dôme de sel pour l'extraction de sel gemme. Ces cavités sont isolées, à l'exception des cavités Nord et Sud qui ont été en communication hydraulique jusqu'à ce que les boues d'épuration y soient injectées.

L'exploitation par dissolution est située à proximité de l'ancienne mine de St Pandelon qui a connu plusieurs effondrements et dont les plus récents se sont produits en 1982 et 1986. Suite à l'effondrement de 1982, une campagne de nivellement a été mise en place en 1983 pour mesurer les mouvements de surface induits par l'ancienne exploitation ainsi que par les cavités de dissolution.

Le Centre de Géosciences de MINES ParisTech a été impliqué à plusieurs reprises dans l'étude de stabilité de l'exploitation notamment celle de la grande cavité S811 (rapports de 1981, 1982, 2000, 2005, 2010, 2014 et 2018). L'étude de 2010 s'est intéressée également à l'ancienne exploitation et aux effondrements qui lui sont associés.

La société envisage la création d'une nouvelle cavité S221 dont il faut définir l'emplacement par rapport aux cinq cavités existantes ainsi que par rapport à l'ancienne exploitation. La réalisation d'une deuxième cavité S321 de mêmes dimensions est également envisagée avec la nécessité de définir dans ce cas la largeur du pilier à conserver entre les deux nouvelles cavités.

La présente étude se propose de traiter ces deux questions en s'appuyant sur les données acquises sur l'exploitation, notamment lors de l'étude de 2010 qui portait sur la stabilité à long terme des cavités de dissolution (Réf. R100318FHAD). Elle commence par un rappel des données géologiques et géotechniques des terrains ainsi que des caractéristiques des cinq cavités actuelles et de l'ancienne exploitation. La forme théorique de la nouvelle cavité est décrite et une modélisation numérique de son comportement est réalisée dans le but d'étudier ses conditions de stabilité ainsi que sa zone d'influence. Les résultats de cette modélisation et le retour d'expérience sur les cavités existantes permettent alors de conclure.

## **2. DONNEES GENERALES DU SITE**

### **2.1 Historique de l'exploitation**

L'exploitation ancienne dans la mine a débuté par le creusement de galeries au niveau -105 entre 1881 et 1885. Cet étage a été noyé à la fin de 1885 et l'ennoyage a été suivi par un effondrement à l'aplomb du point d'entrée d'eau de la mine. Entre 1885 et 1890, l'exploitation a repris dans l'étage -70 qui a été également noyé à la fin de cette période. Les travaux se sont poursuivis par la suite dans l'étage -135 jusqu'à 1905. Ce dernier étage a été partiellement noyé en 1890, puis complètement en 1905, date à laquelle l'exploitation a été abandonnée.

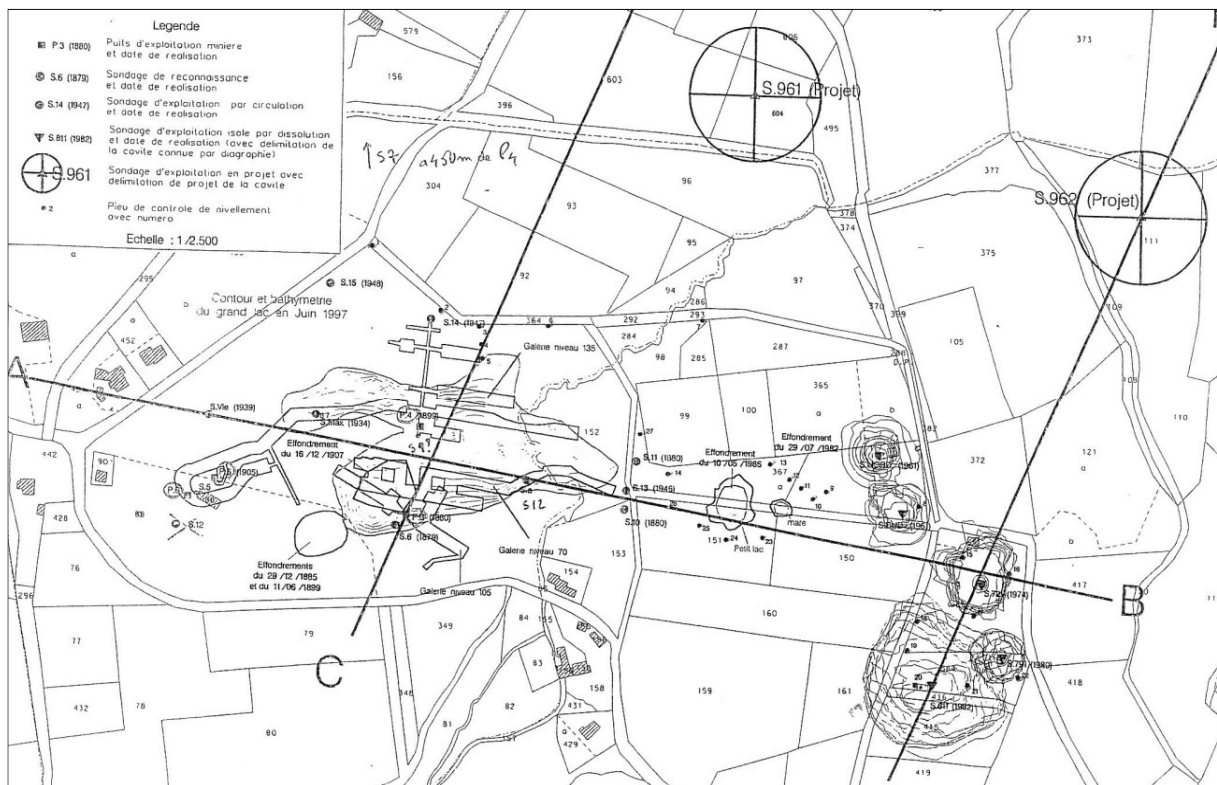
Le 16 décembre 1907, un effondrement important s'est produit en surface avec un contour qui correspond à l'extension de l'étage -70 (Figure 1). Onze sondages ont été alors forés entre 1905 et 1948 pour y pomper de la saumure ou y injecter de l'eau douce. Ces sondages étaient tous en communication avec les travaux miniers souterrains. Le lessivage incontrôlé a conduit à l'extension de l'effondrement au fur et à mesure du pompage de la saumure dans les sondages. Cette procédure d'exploitation s'est poursuivie jusqu'en 1962.

En 1982 et 1986 deux effondrements se sont produits à l'est de l'ancienne mine. Ces effondrements résultent probablement de la dissolution non contrôlée du sel au toit du gisement consécutive des pompages. Une insuffisance des injections d'eau a entraîné le drainage au contact du sel des eaux douces situées dans le recouvrement ou des eaux de surface, par des fractures verticales. Au point de contact entre les eaux douces et le sel, des

cavités se sont formées par dissolution. La remontée de ces cavités sous forme de fontis a pu conduire aux deux effondrements observés.

L'exploitation moderne a démarré en 1965 avec la réalisation de deux sondages S-Nord et S-Sud pour une exploitation par dissolution avec des cavités isolées. Ces deux sondages sont entrés en communication en 1980 et ont été par conséquent exploités en doublet (S-Sud injecteur et S-Nord extracteur). Les trois autres sondages S721, S791 et S811 sont restés isolés entre eux et isolés du doublet. Les sondages S-Sud, S-Nord, S721 et S791 sont épuisés et ne sont plus exploités. L'exploitation actuelle se fait uniquement au niveau du sondage S811 qui est en fin de vie, ce qui justifie le développement des nouvelles cavités S221 et S321.

La Figure 1 donne la localisation des ouvrages souterrains ainsi que les zones d'effondrement liés à l'exploitation ancienne et au lessivage incontrôlé par sondages. On trouve également dans cette figure l'emplacement des 5 cavités exploitées par dissolution. La Figure 2 donne une vue en plan plus récente de ces cavités ainsi qu'une coupe verticale.



**Figure 1 : Localisation des ouvrages souterrains et des effondrements survenus**

Les caractéristiques des cinq cavités sont résumées dans le Tableau 1. La Figure 3 donne une illustration des épaisseurs des piliers entre cavités à 165 m de profondeur et le Tableau 2 donne l'épaisseur minimale du pilier entre deux cavités adjacentes estimée à partir de ces coupes.

## **2.2 Caractéristiques géotechniques des terrains**

L'exploitation se fait dans un dôme de sel recouvert par des terrains argileux appelés "caprock". L'épaisseur moyenne de la couverture est de l'ordre de 100 m et l'extension en profondeur du sel semble être très importante (supérieure à 3000 m). Latéralement, l'extension semble être aussi très importante, mais elle reste encore mal connue en dehors de la concession.

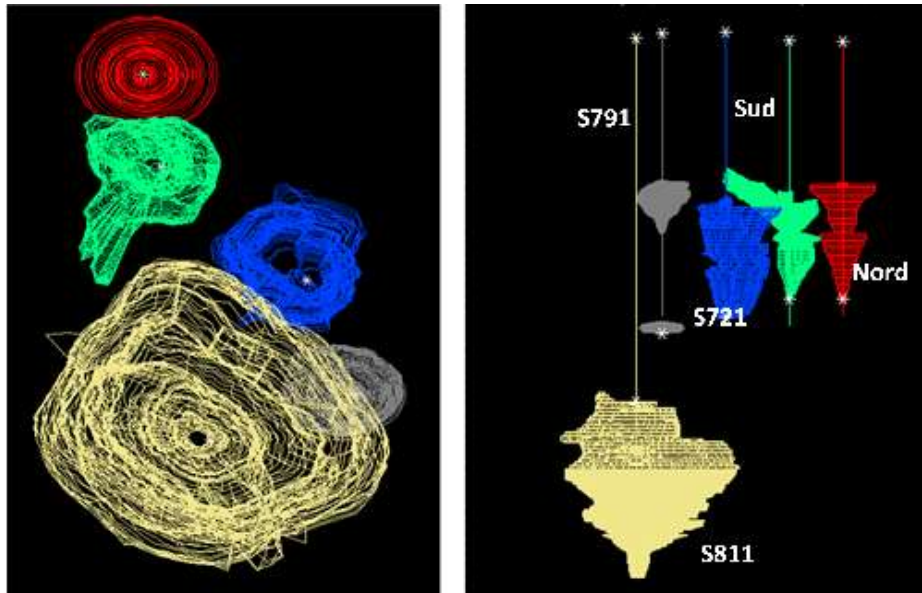


Figure 2 : Localisation des cinq cavités exploitées par dissolution

Tableau 1 : Caractéristiques des cinq cavités

Cavité	Historique d'exploitation	Volume total (m <sup>3</sup> )	Commentaires
S-Nord	- 1965 au 04/1980 : sondage isolé - 04/1980 au 09/1984 : doublet S-S injecteur et S-N extracteur - 02/1989 au 08/2004 : remplissage de boues	85 545	- arrêt d'exploitation depuis 1984 - cavité entièrement remplie de boues
S-Sud	- 1965 au 04/1980 : sondage isolé - 04/1980 au 09/1984 : doublet S-S injecteur et S-N extracteur - 09/2004 : remplissage de boues	92 020	- arrêt d'exploitation depuis 1984 - cavité en cours de remplissage avec les boues
S721	- 1973 à 1990 : exploitation par sondage isolé	175 321	- arrêt d'exploitation depuis 1990 - forte quantité d'insolubles
S791	- 09/1980 au 12/1982 : exploitation partie basse - 12/1982 au 06/1997 : exploitation partie Haute	44 913	- arrêt d'exploitation depuis 1997 - présence d'insolubles
S811	- depuis 1982 : exploitation par sondage isolé	811 362	- cavité en cours d'exploitation - géométrie finale calculée par le centre de Géosciences en 2018

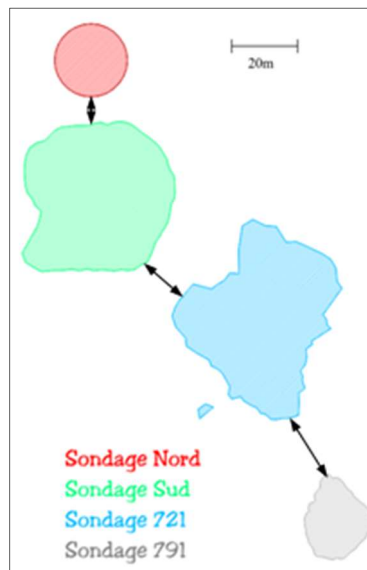


Figure 3 : Coupe à 165 m de profondeur illustrant les épaisseurs des piliers entre cavités

**Tableau 2 : Epaisseurs en mètres des piliers entre cavités adjacentes**

Coupe	Pilier entre les cavités SN-SS	Pilier entre les cavités SS-S721	Pilier entre les cavités S721-S791
220	16	40	-
210	11	32	-
195	5	40	-
180	21	37	-
175	16	31	33
165	9	16	22
155	7	45	27
140	32	71 (pilier entre les cavités SS-S791)	

Dans les études menées par le centre de Géosciences, des essais en laboratoires ont été effectués pour mesurer, dans un premier temps, les propriétés physiques et élastiques du sel (masse volumique, module de Young et coefficient de Poisson, R81/22) puis, dans un deuxième temps, les paramètres du modèle de Lemaitre décrivant le comportement viscoplastique du sel (R050511MTIJ). Rappelons que la loi de Lemaitre exprime le fluage du sel sous un déviateur de contraintes ( $\sigma$ ) en fonction du temps (t) selon une loi en puissance définie par les trois paramètres  $\alpha$ ,  $\beta$  et K :

$$\varepsilon_{VP} = \left( \frac{\sigma}{K} \right)^{\beta} t^{\alpha}$$

En ce qui concerne les terrains argileux de couverture, leur comportement est considéré élastique et leurs propriétés sont celles retenues dans l'étude de 2005. Le Tableau 3 rappelle les caractéristiques géotechniques du sel et des terrains de couverture.

**Tableau 3 : Caractéristiques mécaniques du sel et des terrains de couverture**

Formation	Masse volumique (Kg/m <sup>3</sup> )	Module de Young (MPa)	Coefficient de Poisson	$\alpha$	$\beta$	K (MPa, à T=30°C)	Indice de fluage (%)
Sel	2140	11500	0.3	0.48	2.33	0.35	4.2
Couverture	2600	15000	0.3	-			

Dans la loi de Lemaitre telle qu'elle est présentée, le temps est en jour, les contraintes sont en MPa et les déformations sont en micron/mètre. L'indice de fluage correspond à la déformation viscoplastique obtenue au bout d'une année sous un déviateur de 10 MPa. Cet indice montre que le sel étudié est moyennement fluant ; les sels peu fluants ont des indices inférieurs à 1 % et ceux très fluants peuvent avoir des indices supérieurs à 10 %.

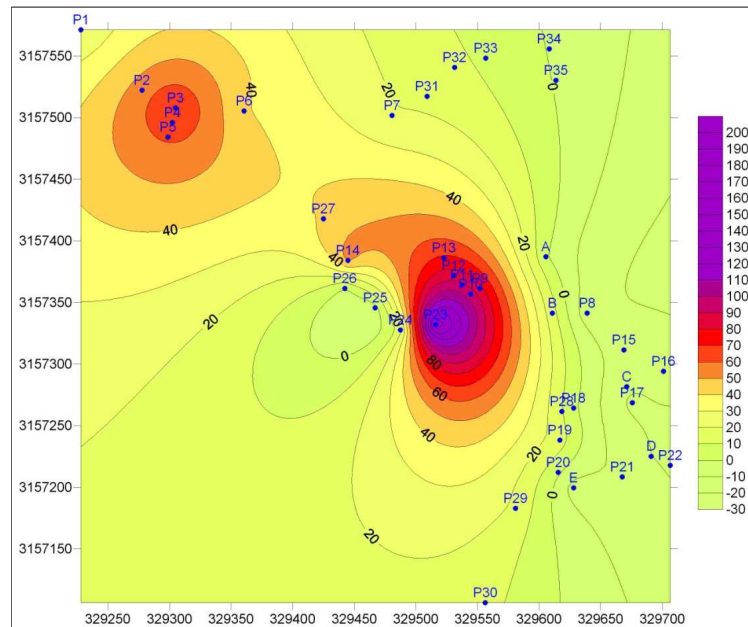
Avant toute exploitation du dôme de sel, le champ de contraintes géostatiques est supposé isotrope et variant linéairement avec la profondeur (contraintes initiales horizontales égales à la composante initiale verticale).

### 2.3 Conditions de stabilité des cavités actuelles

Pour se prononcer sur la stabilité des cavités actuelles, l'étude de 2010 s'est basée sur l'analyse des mesures de subsidence ainsi que sur la modélisation du comportement de chaque cavité en la considérant isolée et en délimitant sa zone d'influence. La même approche a été appliquée en 2018 à la cavité S811 pour étudier la dernière phase de son exploitation. Les principales conclusions de ces études peuvent être résumées comme suit :

- Les têtes des sondages des cinq cavités n'indiquent pas de mouvements en surface liés à l'exploitation par dissolution.
- Les seuls mouvements de subsidence significatifs sont liés à l'exploitation ancienne qui a été à l'origine de plusieurs effondrements.
- la cavité S811 se comporte comme une cavité isolée et n'a aucune interaction avec les quatre autres cavités.

- Les deux cavités S-Nord et S-Sud interagissent fortement notamment au niveau des horizons situés aux profondeurs 155 à 175 m et 195 à 220 m et l'épaisseur moyenne du pilier les séparant est seulement de 17 m. Etant donné que ces deux cavités sont totalement pleines de boue d'épuration de saumure et qu'il n'est plus possible d'effectuer des mesures sonar pour contrôler leur forme et l'épaisseur de leur pilier, il a été recommandé la poursuite régulière des mesures de nivellement de surface et leur renforcement dans cette zone pour détecter tout changement dans l'allure de la subsidence qui serait le résultat de la dégradation de l'état du pilier.
- Deux zones importantes font l'objet de mouvements significatifs (Figure 4) : la première zone est située entre l'effondrement de 1982 et les deux cavités des sondages Nord et Sud (bornes P9, P10, P11 et P23), et la seconde zone est liée à l'ancienne exploitation et à l'effondrement important survenu en 1905 (bornes P2 à P6, P14 et P27). Les mouvements de la première zone sont induits par l'effondrement de 1982 et ont subi une accélération avec l'effondrement de 1986. L'amplitude maximale enregistrée depuis le début des mesures est égale à 40 cm et concerne la borne P10. L'accélération du mouvement s'est étalée jusqu'en 1997, puis la vitesse s'est stabilisée autour de valeurs de 2.34 mm/an pour la borne P10, et 0.62 mm/an, pour la borne P9. Il est important de noter à cet égard que les bornes P24, P25 et P26, situées au sud de cette zone, n'indiquent aucun mouvement important.



**Figure 4 : Subsidence en mm à la date du 25 mars 2009**  
(coordonnées Lambert III, à noter la disparition des bornes 2, 4, 5, 10 et 11)

## 2.4 Géométrie des nouvelles cavités

Comme le montre la Figure 5, les nouvelles cavités envisagées S221 et S321 présentent les caractéristiques géométriques suivantes :

- un diamètre de 80 m ;
- un toit sphérique situé entre les profondeurs 120 et 160 m de rayon 40 m ;
- l'abandon au toit au sommet de la cavité d'une garde de sel de 20 m étant donné que le mur de la couverture se situe à 100 m ;
- le mur de la cavité se situe à la profondeur 320 m et sa base a une forme conique avec un angle de l'ordre de 27° ;
- la partie cylindrique de la cavité sera ainsi développée sur une hauteur de 140 m (entre les profondeurs 160 et 300 m).

Une telle géométrie de cavité conduit à un volume de l'ordre de 862 000 m<sup>3</sup>.

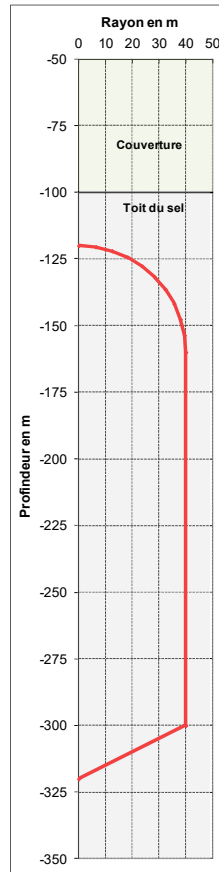


Figure 5 : Forme théorique des nouvelles

### 3. MODELISATION DE LA STABILITE DES NOUVELLES CAVITES

#### 3.1 Méthodologie suivie

L'approche de modélisation mise en œuvre est simple et consiste à la réalisation d'une modélisation numérique en 2D avec l'hypothèse de l'axisymétrie d'une cavité seule considérée totalement isolée et créée dans un massif infini. L'examen de la zone d'influence de la cavité permettra de déduire la largeur minimale du pilier à abandonner pour éviter toute interaction avec une cavité voisine équivalente ou avec les cavités existantes.

Compte tenu du fluage du sel et de la longue durée simulée, les calculs sont réalisés en grandes déformations en réactualisant la géométrie du maillage chaque fois que la distance entre le sommet et la base de la cavité subit une variation relative de 0.1 %.

Les principales hypothèses admises dans la modélisation numérique sont les suivantes :

- La création de la cavité est modélisée par un processus classique qui consiste à appliquer à la paroi de la cavité finale un chargement qui passe progressivement de l'état de contraintes géostatiques (celui qui régnait avant la création de la cavité) vers une pression de la colonne de saumure (chargement effectivement appliqué à la fin du lessivage de la cavité). L'expérience montre que l'état des contraintes et des déformations autour de la cavité juste après sa création dépend principalement de sa durée de creusement. Admettons une durée de lessivage de 10 ans.
- La stabilité à long terme de la cavité est étudiée sur une durée d'un siècle en faisant l'hypothèse d'un abandon en saumure à puits ouverts. L'effet des insolubles qui, à la fin du lessivage, occupent une certaine proportion des vides créés et participent ainsi à la stabilisation des cavités, est ainsi négligé.
- L'hypothèse des cavités à puits ouverts implique que les problèmes thermiques (dilatations, effet de la variation de la température sur le fluage du sel), la diffusion de la saumure dans le sel (micro-perméabilité) et les phénomènes physico-chimiques de



dissolution et de recristallisation ne sont pas pris en compte. Ces points sont difficiles à évaluer et font l'objet maintenant de sujets de recherche. Ils ont cependant des effets de second ordre par rapport aux phénomènes considérés dans la présente étude. Nous avons appliqué l'état des connaissances actuelles et les règles de l'art qui ont fait leurs preuves sur de nombreux exemples.

Lors de l'analyse des résultats des simulations numériques, nous nous intéresserons particulièrement aux grandeurs suivantes :

- la déformée des terrains et l'évolution des mouvements de surface en fonction du temps ;
- la perte de volume de la cavité en fonction du temps ;
- le champ de la contrainte mineure ;
- le déviateur de contraintes aux abords de la cavité ;
- les déformations viscoplastiques aux abords de la cavité.

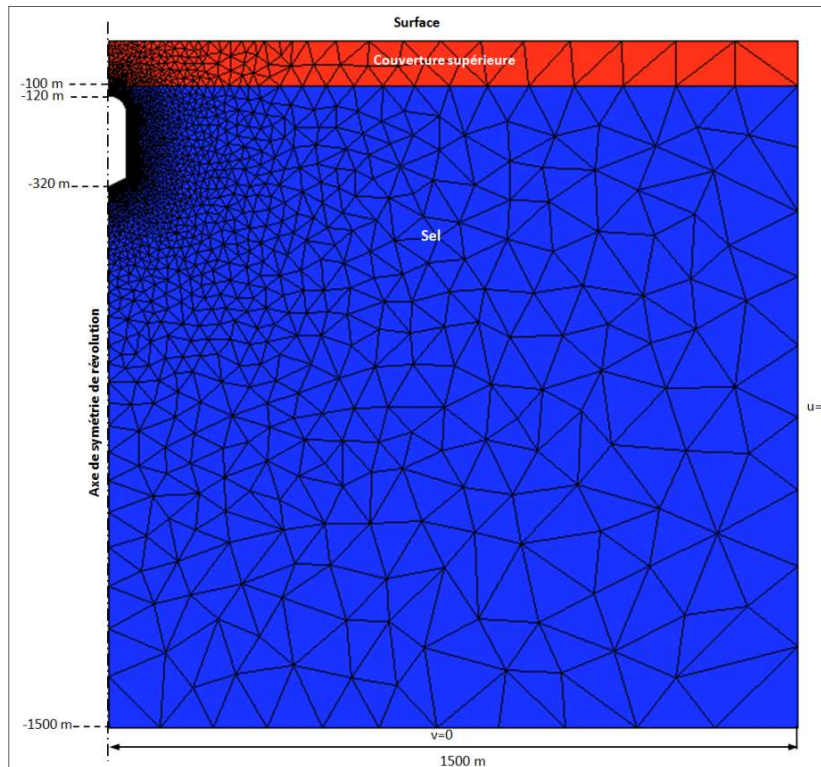
L'intérêt que présente l'étude temporelle des variations volumiques ou des déplacements dans des régions particulières est relativement évident. En revanche, l'intérêt que nous portons à des grandeurs physiques plus abstraites mérite d'être brièvement expliqué.

- *Contrainte mineure* : Le sel supporte mal d'être sollicité en traction : une contrainte de traction de 1 MPa suffit en général à le fracturer. Or l'éventualité d'une fracturation du sel à proximité de la cavité est à proscrire formellement puisqu'elle risquerait de provoquer une infiltration de la saumure dans les formations géologiques situées aux alentours de la cavité. Une zone dans laquelle la contrainte mineure est une contrainte de compression mais proche de zéro présente également des risques à long terme car les contraintes dans le massif se relâchent avec le temps (phénomène de relaxation), des zones en traction localisées peuvent alors apparaître à terme. La deuxième raison pour laquelle la contrainte mineure doit être examinée réside dans le fait que le sel est un matériau ductile. Pourvu que la contrainte mineure de compression dépasse un certain seuil (généralement, entre 1 et 3 MPa), il est apte à encaisser des contraintes sans risquer la rupture en compression simple. Il faut donc rechercher les zones où la contrainte mineure est inférieure à ce seuil pour y examiner ce risque.
- *Déviateur de contraintes* : Le déviateur mesure l'écart de l'état de contraintes avec un état de pression géostatique moyen. Les zones dans lesquelles il dépasse un seuil critique sont susceptibles d'un endommagement diffus mais néanmoins préjudiciable à la stabilité et à l'imperméabilité du massif (notion de dilatance). Ce seuil critique dépend du sel envisagé et varie entre 9 et 15 MPa. Compte tenu du phénomène de relaxation, le déviateur de contraintes baisse dans le temps et le critère de dépassement du seuil doit être contrôlé juste à la fin de la création de la cavité.
- *Déformations viscoplastiques* : Certains spécialistes considèrent que les seuils des critères précédemment évoqués dépendent de la manière dont on réalise les essais en laboratoire sur le sel, et donc ne suffisent pas à écarter totalement le risque d'un endommagement du massif salin. Ils suggèrent donc d'étudier les déformations viscoplastiques irréversibles du massif et d'identifier les zones à risque dans lesquelles la norme exprimée en % dépasse un certain seuil. Ce seuil varie généralement entre un dixième de pourcent et plusieurs pourcents selon la fluabilité du sel et la durée envisagée. Dans l'étude de 2005 portant sur la cavité S811, le critère utilisé consistait à ce que la zone entourant la cavité dans laquelle la norme du tenseur de déformation viscoplastique est supérieure à 0.1 % par siècle ne doit pas toucher des interfaces avec d'autres couches géologiques ni rencontrer des zones exploitées (cavités).

### **3.2 Analyse de la stabilité**

La modèle numérique développé pour la cavité isolée commence depuis la surface et intègre la couverture et la formation saline jusqu'à une profondeur située suffisamment loin de la

zone perturbée par le creusement de la cavité (1500 m). Latéralement, le modèle est défini, d'un côté, par l'axe de symétrie de révolution passant par le centre de la cavité, et de l'autre côté, par une frontière verticale située, de la même façon, suffisamment loin pour sortir de la zone d'influence de la cavité (1500 m). Le long de l'axe de symétrie ainsi que le long de la frontière latérale, le déplacement horizontal est nul. Sur le bord horizontal inférieur, le déplacement vertical est également nul. La Figure 6 montre le maillage du modèle et ses conditions aux limites.



**Figure 6 : Maillage d'une cavité isolée avec une garde de sel au toit de 5 m**

Trois phases importantes ont été prises en compte dans la simulation de l'historique de la cavité :

- phase 1 : application d'une pression à l'intérieur de la cavité égale à la contrainte géostatique pour simuler les conditions initiales avant lessivage ;
- phase 2 : création de la cavité en 10 ans en faisant décroître linéairement la pression à l'intérieur de la cavité de la valeur correspondant à la contrainte initiale à la valeur de la pression de la colonne de saumure (pression halmostatique) ;
- phase 3 : période de repos à puits ouvert jusqu'à une durée totale d'un siècle en maintenant la pression de la colonne de saumure constante (phase de fluage du sel).

Nous nous sommes intéressés en premier lieu aux mouvements des terrains induits par la création de la cavité. Les Figures 7, 8, 9 et 10 montrent respectivement la déformée de la cavité, amplifiée par un facteur de 50, à la fin du lessivage et à la fin de la période simulée de 100 ans, la perte de volume de la cavité durant toute la période simulée, la subsidence de la surface ainsi que sa vitesse au droit de la cavité pour toute la période simulée et enfin la forme de la cuvette de subsidence pour les deux dates caractéristiques.

La déformée et la perte de volume de la cavité restent très limitées. Ainsi, au bout d'un siècle, la cavité perd environ 1 % de son volume. La subsidence induite en surface est par conséquent très réduite : son amplitude maximale à la fin de la période simulée est très peu perceptible (17 mm), et sa vitesse maximale est atteinte à la fin du lessivage (0.6 mm/an) et décroît rapidement pour tendre vers une valeur extrêmement faible.

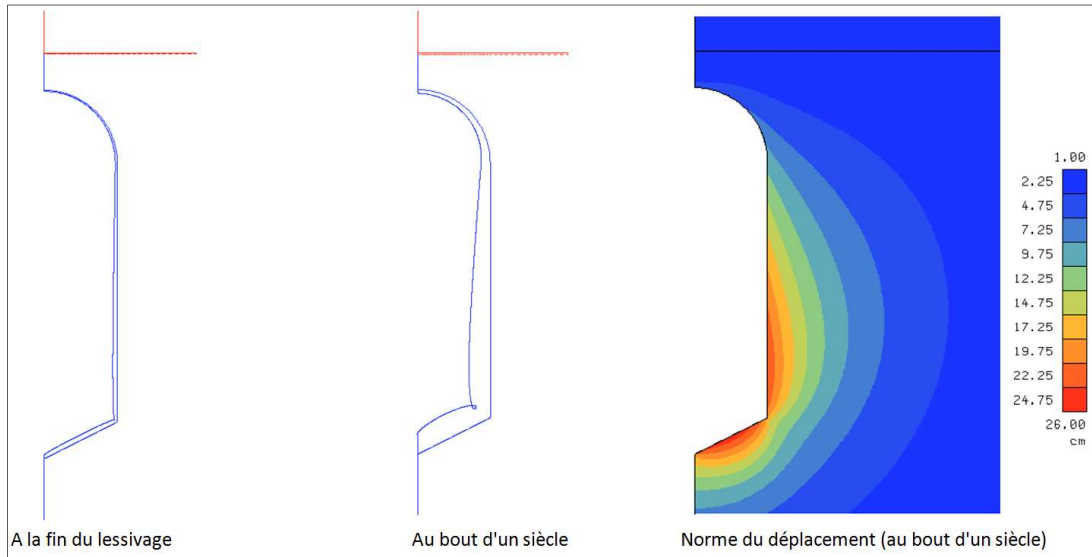


Figure 7 : Déformée de la cavité à la fin du lessivage et au bout d'un siècle (x 50)

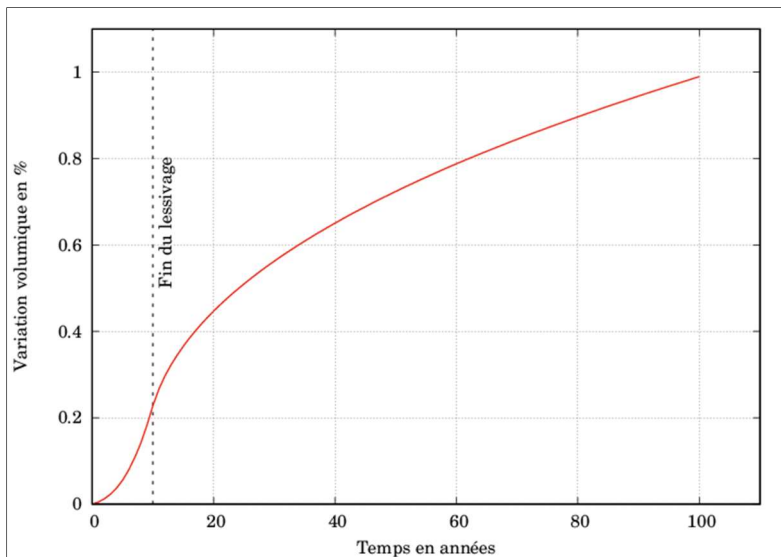


Figure 8 : Perte de volume de la cavité en fonction du temps

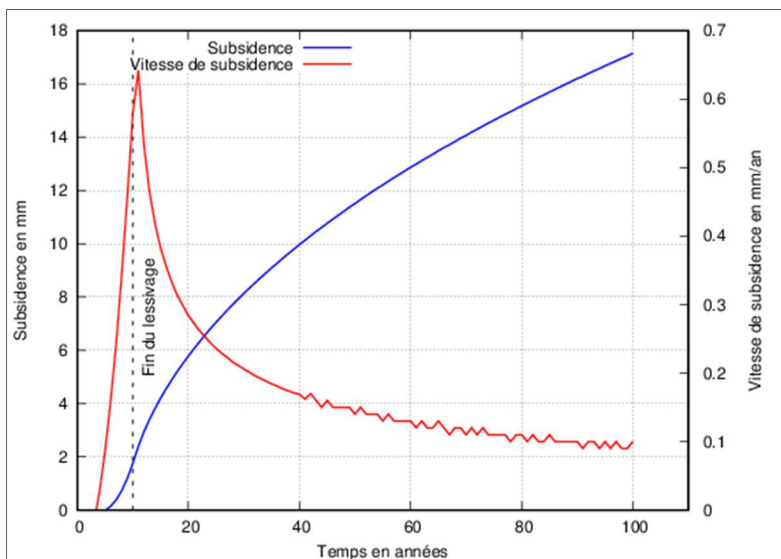


Figure 9 : Subsidence de la surface et vitesse de subsidence en fonction du temps au droit de la cavité

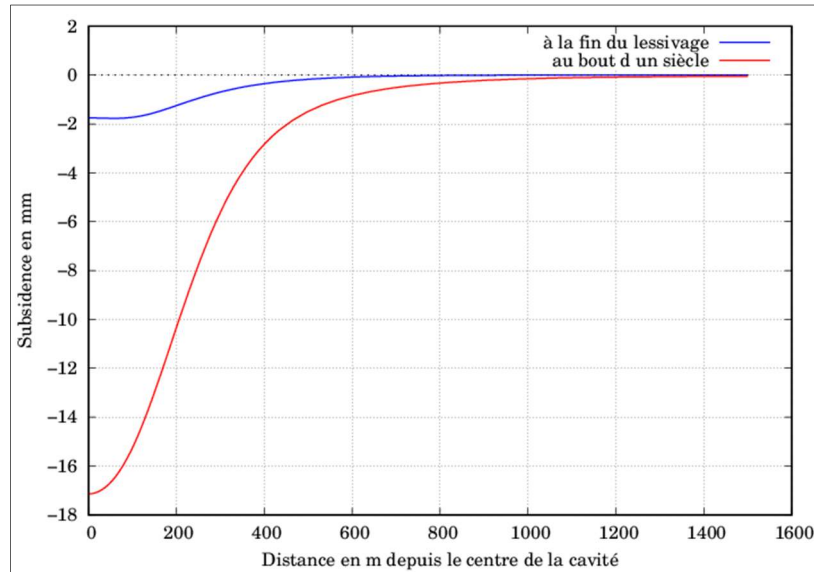


Figure 10 : Evolution de la cuvette de subsidence en surface pour les deux dates

Les contraintes ont été analysées en priorité par rapport au risque de rupture par traction. La répartition de la contrainte principale mineure montre que le régime de contraintes dans tout le massif reste toujours un régime de compression triaxiale et qu'aucune traction n'apparaît ni à la fin du lessivage ni au bout de la période simulée d'un siècle. La contrainte principale moyenne la plus faible, qui joue le rôle de confinement, est de l'ordre de 1.5 MPa en valeur absolue (Figure 11).

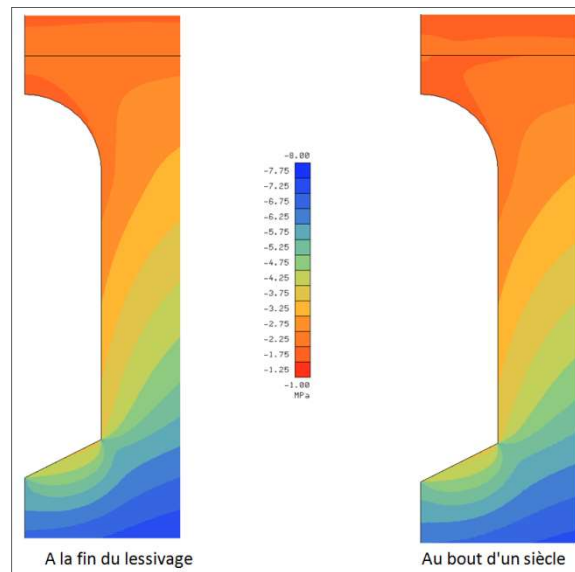
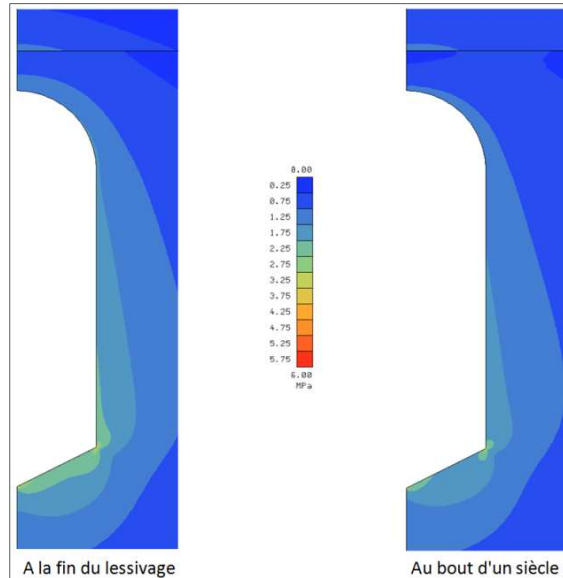


Figure 11 : Contrainte principale mineure à la fin du lessivage de la cavité et au bout d'un siècle (le signe négatif indique une compression)

Le risque d'endommagement du sel par dilatance est également à écarter car même en admettant le seuil très sécuritaire de 9 MPa pour le déviateur dilatant sans tenir compte de l'effet de confinement (ou de la pression moyenne), le déviateur de contraintes aux parois de la cavité, notamment à la fin du lessivage, reste largement inférieure à ce seuil. Les plus fortes concentrations sont très localisées aux points anguleux de la cavité qui sont dans la réalité lissés par le lessivage (Figure 12).

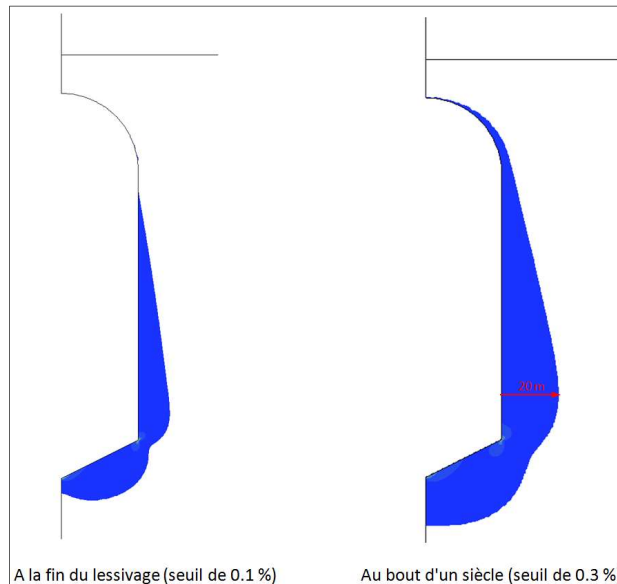
Compte tenu de l'indice de fluage du sel qui témoigne d'un sel moyennement fluant, le seuil très sécuritaire de 0.1 % retenu dans les études précédentes pour une durée d'un siècle semble être très restrictif. Lorsqu'il est appliqué à la fin de la phase de lessivage, la zone

affectée autour de la cavité reste très circonscrite. En revanche, au bout d'un siècle, l'utilisation de ce seuil conduit à une zone très développée dans les parois notamment vers la base de la cavité. Sur la base de notre expérience, nous avons opté pour un seuil de 0.3 % dans le but d'optimiser la zone d'influence de la cavité et par conséquent la largeur du pilier séparant deux cavités adjacentes de mêmes dimensions.



**Figure 12 : Déviateur de contraintes à la fin du lessivage de la cavité et au bout d'un siècle**

Comme le montre la Figure 13, l'extension maximale de la zone des déformations viscoplastiques à la paroi de la cavité, moyennant le seuil de 0.3 %, est de l'ordre de 20 m au bout d'un siècle. Ce résultat suggère la conservation d'un pilier sécuritaire entre deux cavités adjacentes de mêmes dimensions de largeur environ 50 m pour éviter le chevauchement des zones des déformations viscoplastiques.



**Figure 13 : Norme du tenseur des déformations viscoplastiques à la fin du lessivage de la cavité et au bout d'un siècle**

En ce qui concerne la garde de sel, ses conditions de stabilité sont assurées quelque soit le seuil appliqué. L'adoption d'une forme semi-sphérique du toit de la cavité joue un rôle très favorable dans cette stabilité.

L'analyse des contraintes dans les terrains de couverture n'a mis aucun risque de rupture par excès de compression moyennant le critère de Coulomb et des propriétés moyennes retenues pour ces formations (résistance en compression simple et angle de frottement).

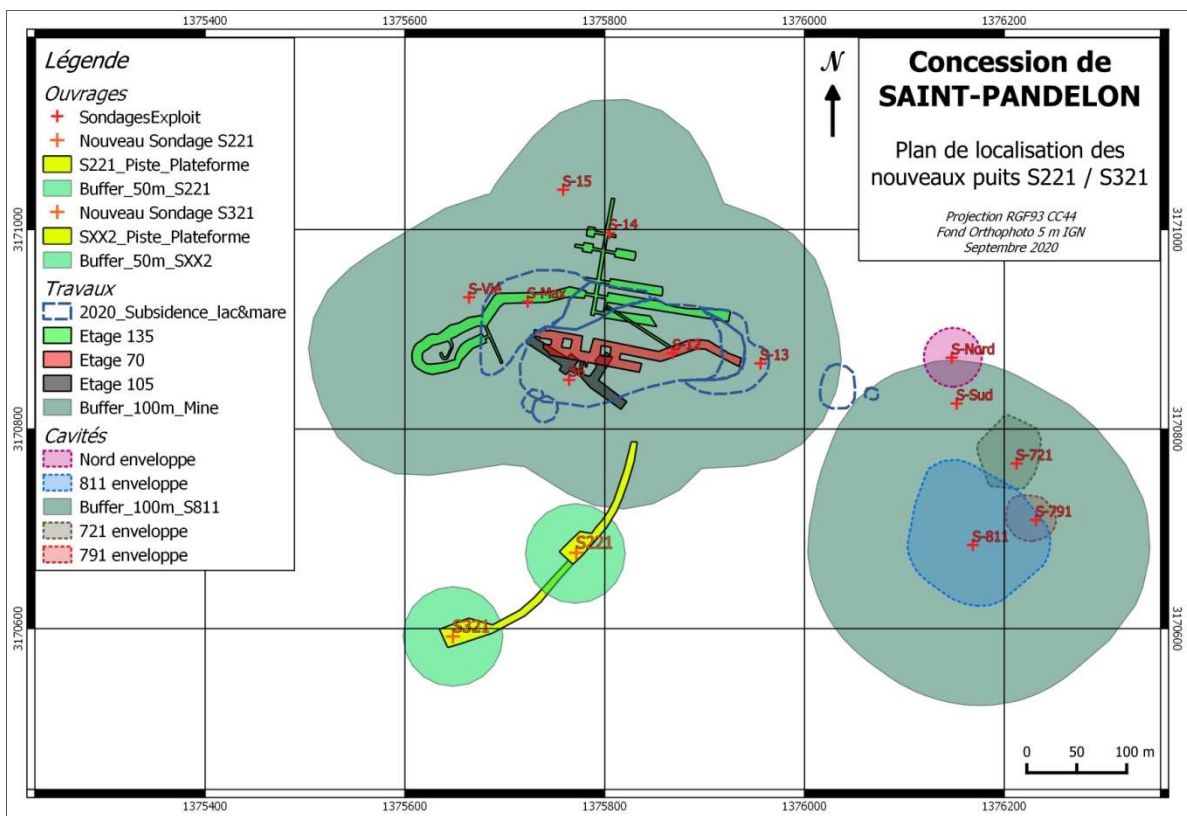
#### 4. CONCLUSION

La modélisation numérique effectuée dans cette étude a confirmé les conditions de stabilité à long terme d'une nouvelle cavité isolée dans le champ de saint Pandelon présentant les dimensions et la forme géométrique suivantes : diamètre maximal de 80 m, toit semi-sphérique de rayon 40 m, garde de sel au toit de 20 m, forme conique à la base d'angle 27° et hauteur de la partie cylindrique de 140 m.

La réalisation d'une seconde cavité de mêmes caractéristiques nécessite la conservation d'un pilier de 50 m de largeur au niveau de la partie cylindrique.

Concernant l'emplacement de ces nouvelles cavités par rapport aux cinq cavités existantes, nous recommandons de les positionner à une distance plus importante que la simple largeur de pilier de 50 m pour les isoler totalement de toute incidence possible. Lors de la conception des cavités salines de stockage de gaz naturel qui sont largement plus sollicitées que les cavités en saumure, on applique généralement la règle d'ingénieur qui consiste à laisser un pilier de largeur deux fois le diamètre moyen des cavités (règle également utilisée pour le dimensionnement de galeries ou de tunnels parallèles). Dans le cas particulier de cavités en saumure, nous recommandons une largeur intermédiaire de l'ordre d'une fois le diamètre. Cela conduirait à un pilier de largeur moyenne environ 100 m.

Les Figures 14 et 15 montrent l'emplacement prévu pour ces deux nouvelles cavités. Leur pilier est de 70 m et dépasse la largeur préconisée de 50 m. De la même façon, la distance les séparant des cavités existantes est bien plus importante par rapport à la consigne de 100 m : elle est de l'ordre de 300 m par rapport à la cavité la plus proche S811, et de 110 m par rapport aux anciens travaux les plus proches du niveau 105 m.



**Figure 14 : Vue en plan montrant l'emplacement des deux nouvelles cavités S221 et S321 par rapport aux cinq cavités existantes et l'exploitation ancienne**



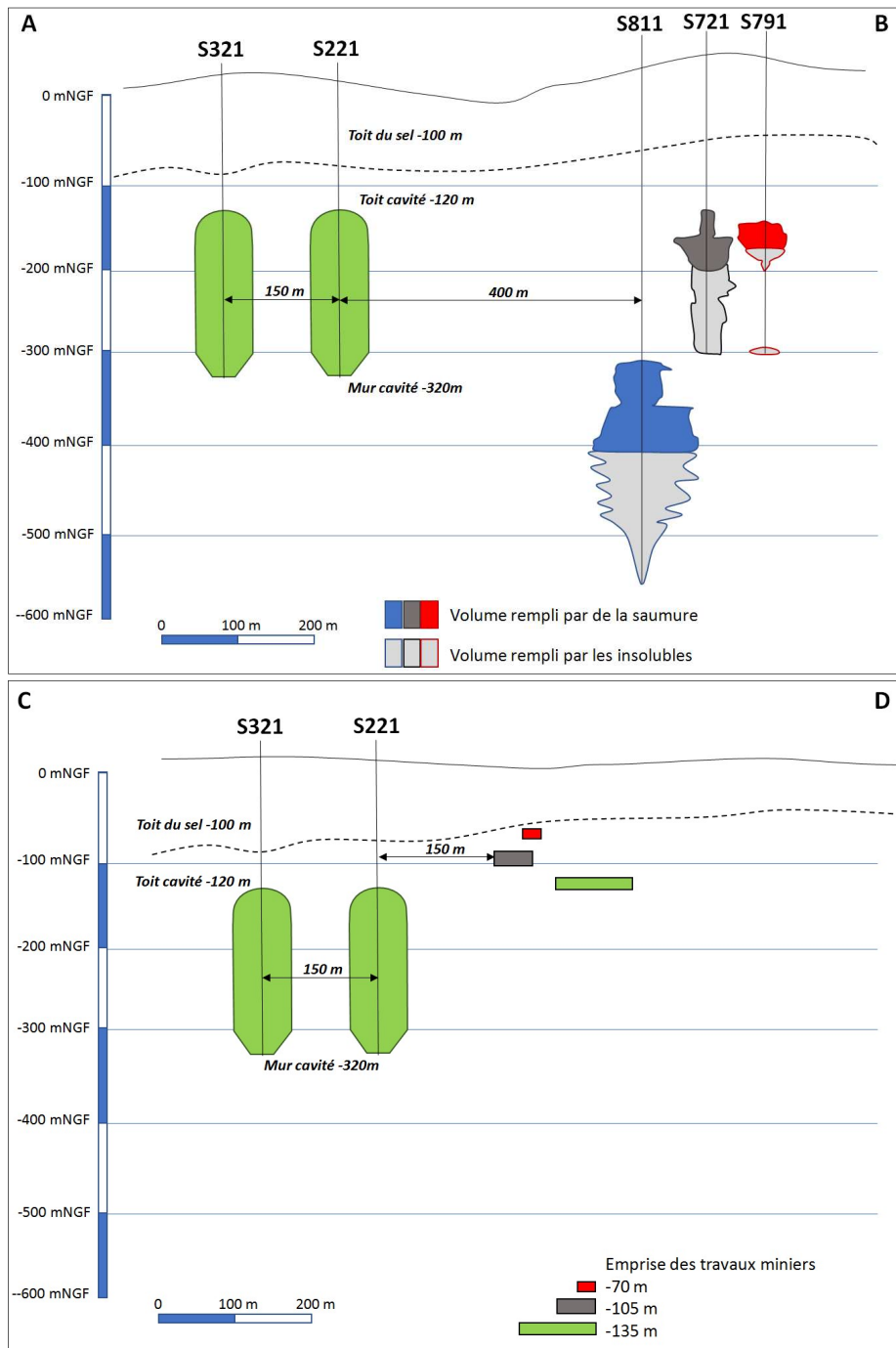


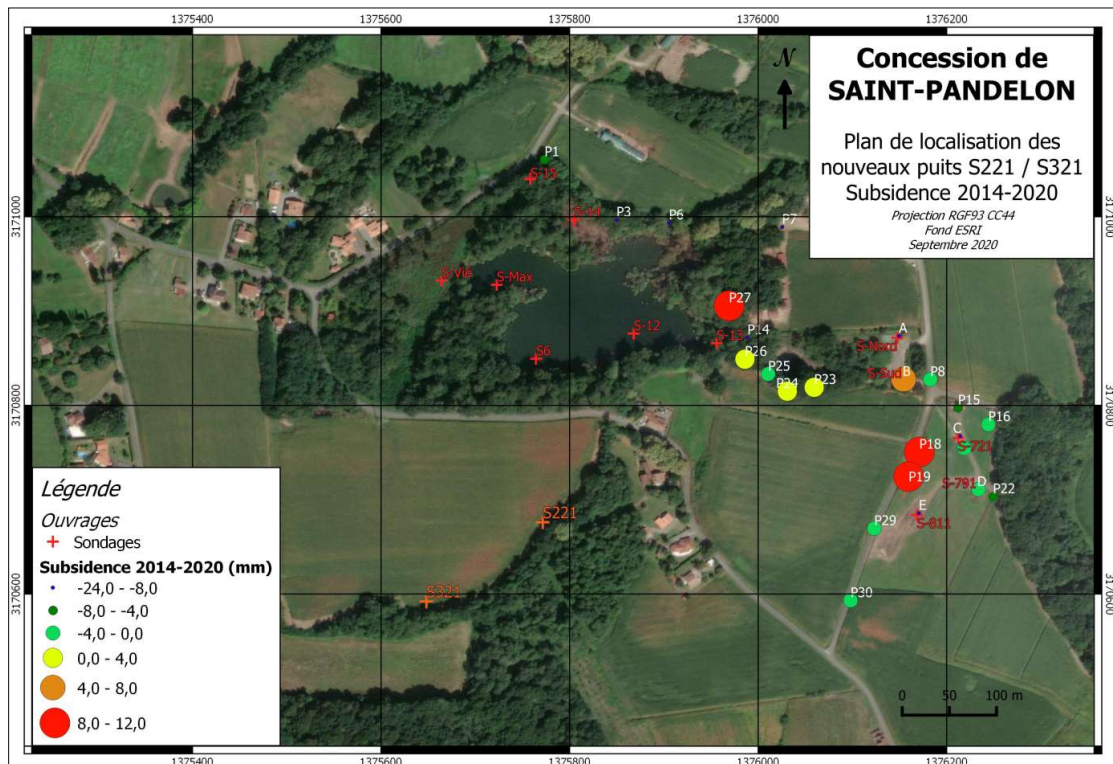
Figure 15 : Coupes verticales montrant l'emplacement des deux nouvelles cavités S221 et S321 par rapport aux cinq cavités existantes (en haut) et par rapport à l'exploitation ancienne (en bas)

Pour ce qui est des interactions possibles entre les deux nouvelles cavités et la partie sud de l'ancienne exploitation ainsi que le risque de voir apparaître dans la zone les séparant des effondrements équivalents à ceux de 1982 et 1986, les observations et les analyses suivantes permettent de conclure en l'absence de ce risque et de confirmer que le pilier de 110 m de largeur est suffisant pour garantir la stabilité à long terme de la nouvelle exploitation :

- Les effondrements affectant le sud des anciens travaux miniers, c.à.d. au nord des deux nouvelles cavités envisagées, datent de la fin du 19<sup>ème</sup> siècle et aucun nouveau dérangement de surface ayant un impact visible en surface n'a affecté ce secteur depuis lors (Figure 16) ;

- Le toit du diapir remonte du sud vers le nord-est. Il est à 40 m de profondeur à l'est des anciens travaux miniers, contre plus de 80 m de profondeur, pour les nouvelles cavités. Cette géométrie exclue la possibilité de dissolution du sel aval pendage vers le sud-ouest.
- Les effondrements de 1982 et 1986 affectant l'est de l'ancienne exploitation pourraient être expliqués par l'un ou la conjugaison des trois phénomènes suivants :
  - l'exploitation du sondage S13 situé à la limite est des anciennes galeries (Figure 14), ce sondage n'est plus en service depuis 1967 ;
  - une dissolution non contrôlée du sel au toit du gisement en amont pendage par les eaux douces situées dans le recouvrement ou les eaux de surface drainées par des fractures verticales ;
  - l'exploitation des 2 sondages S-Nord et S-Sud rentrés en communication et dans lesquels l'injection d'eau douce a cessé dans les années 70.
- Les forages au diamètre d'exploitation des nouvelles cavités seront précédés, sur le même emplacement, de forages de reconnaissance en petit diamètre pour confirmer la cote du toit du sel et la présence ou non de dissolution au toit du sel. En fonction des résultats des forages de reconnaissance, les forages d'exploitation seront équipés de 1 ou 2 casings de protection au toit du sel.
- Le développement des nouvelles cavités se fera de 320 m de profondeur au mur, à 120 m de profondeur au toit si les opérations de forage confirment l'absence de dissolution au toit du sel. La profondeur minimale d'exploitation de la cavité pourra être adaptée en fonction des observations lors des opérations de forage.

Comme pour l'exploitation actuelle, il est recommandé d'implanter des stations de mesure de subsidence de la surface au tour des nouvelles cavités, notamment dans le secteur nord les séparant de l'ancienne exploitation. La Figure 16 montre l'emplacement des deux nouvelles cavités par rapport aux dernières mesures de subsidence effectuées et indique clairement la zone à couvrir par les nouvelles stations à implanter.



**Figure 16 : Emplacement des nouvelles cavités S221 et S321 par rapport aux mesures de subsidence effectuées depuis 2014**