

RAPPORT D'ÉTUDE
N° DRS-12-108130-02769B

02/03/2012

**Etude de sûreté du confinement à long terme
de la matrice réceptrice compte-tenu de ses
caractéristiques géotechniques**

INERIS

*maîtriser le risque |
pour un développement durable |*

Etude de sûreté du confinement à long terme de la matrice réceptrice compte-tenu de ses caractéristiques géotechniques

Direction des Risques du Sol et du Sous-sol

STOCAMINE

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 équivalents 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.


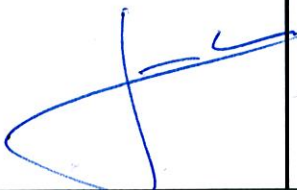

	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	Jean-Claude PINTE	Philippe GOMBERT	Mehdi GHOREYCHI
Qualité	Chef de Projet à la Direction des Risques du Sol et du Sous-sol	Responsable de l'Unité Eaux Souterraines et Emissions de Gaz à la Direction des Risques du Sol et du Sous-sol	Directeur des Risques du Sol et du Sous-sol
Visa			

TABLE DES MATIÈRES

1. APPROCHE RETENUE.....	5
2. DESCRIPTION SOMMAIRE DE L'EXPLOITAION ET DU STOCKAGE.....	7
2.1 formations géologiques et exploitation miniere	7
2.2 Le stockage.....	10
3. DEMARCHE ADOPTÉE DANS CETTE ETUDE	13
4. COMPORTEMENT MÉCANIQUE DES DIFFERENTS OUVRAGES	17
4.1 Fermeture progressive du stockage.....	17
4.2 Convergence des voies doubles	19
4.3 Compaction des terrains foudroyés.....	20
4.4 Impact de l'ennoyage sur le fluage.....	23
4.5 Volume des vides résiduels et son évolution dans le temps	24
4.6 Stabilité des ouvrages souterrains	28
4.7 Stabilité du stot de séparation entre les mines Amélie et Marie-Louise	32
4.8 Impact des sondages	34
5. CONCLUSION.....	37
6. RÉFÉRENCES	41

1. APPROCHE RETENUE

Le décret n° 2006-283 du 10 mars 2006 indique que la transformation d'un stockage temporaire de déchets en stockage définitif doit s'accompagner d'une « Etude de sûreté du confinement à long terme de la matrice réceptrice compte-tenu de ses caractéristiques géotechniques ».

La définition de l'étude en question mérite d'être précisée.

1. En effet, ni la loi (article L515-7 du code de l'environnement), ni son décret d'application n°2006-283 ne définissent le contenu d'une telle étude. L'introduction de cette notion d'étude de « sûreté » est d'autant plus surprenante qu'au stade de l'autorisation initiale du stockage en couche géologique profonde, les textes parlent d'étude de dangers.

Une enquête sur les textes réglementaire révèle que l'article 84 de la loi "risques" n°2003-699 évoquait déjà les études de sûreté en matière de stockage souterrain profond: une "étude de sûreté démontrant l'innocuité vis-à-vis de la matrice réceptrice, notamment vis-à-vis du confinement naturel" était demandée à l'exploitant réalisant des injections d'effluents industriels dans la structure du Crétacé 4000. Cette étude avait toutefois plutôt un caractère « chimique » que « géotechnique ».

2. Dans un autre contexte, la notion d'« études/rapports de sûreté » se retrouve dans la réglementation des INB (Installations Nucléaires de Base) et des installations de produits explosifs.

Dans la réglementation des INB, le « rapport préliminaire de sûreté » désigne un document

«comportant la description de l'installation et des opérations qui y seront effectuées, l'inventaire des risques de toutes origines qu'elle présente, l'analyse des dispositions prises pour prévenir ces risques et des mesures propres à réduire la probabilité des accidents et leurs effets ». (article 3-I du décret n°63-1228 du 11 décembre 1963).

Dans la réglementation des produits explosifs, l'« étude de sûreté » comprend :

- une présentation et une analyse de la situation géographique, générale et locale, de l'installation, accompagnée d'un plan général de l'installation et de la délimitation des zones de protection des dépôts de produits explosifs ;
- une étude des risques de sûreté et des menaces, prenant en compte les délais d'intervention auprès de l'unité de la police ou de la gendarmerie nationales territorialement compétente ;
- le descriptif exhaustif des moyens techniques déjà existants relatifs à la prévention, la protection, la détection et la dissuasion et de ceux à mettre en place ». (article 17 de l'arrêté du 13 décembre 2005).

Dans l'ensemble, ces notions paraissent mal adaptées dans le cas présent et en particulier ne font pas référence à la notion de « caractéristiques géotechniques » de la matrice ». À cela, on peut ajouter que l'étude de sûreté se présente souvent comme une étude de dangers, mais avec davantage de technicité et de détails : une circulaire ancienne du Secrétaire d'État à l'environnement (aujourd'hui abrogée, mais dont la définition semble toujours d'actualité) indique que le « rapport de sûreté » est « une étude des dangers très complète, qui fait appel, le cas échéant, à une évaluation probabiliste des causes d'accident¹, dans l'esprit des investigations réalisées pour des systèmes qui nécessitent un haut degré de fiabilité ou de sécurité (industrie nucléaire, systèmes d'alarme, chimie...) » (circulaire du 28 décembre 1983 relative aux ICPE, portant sur l'application de la directive "Seveso", abrogée). Dans le cas présent, une démarche probabiliste est difficile à mettre en œuvre en l'absence de retour d'expérience à long terme des stockages souterrains de déchets, en France ou à l'étranger.

Compte tenu des éléments développés ci-dessus, nous proposons que le contenu de l'étude de sûreté demandée dans le cadre du décret du 10 mars 2006 s'inspire, à la fois du contenu prévu par les deux textes cités (INB et explosifs) et des études de dangers, tout en gardant à l'esprit l'exigence de détail et de technicité qui s'attache à l'expression « rapport/étude de sûreté ».

L'étude qui suit s'attache donc à analyser la « sûreté » des éléments successifs qui constitueront la « matrice réceptrice » du site StocaMine après sa fermeture à savoir :

- 1- la stabilité géotechnique des galeries de stockage et leur évolution dans le temps ;
- 2- le comportement mécanique des terrains foudroyés après l'exploitation des couches potassiques et leur compaction résiduelle dans le temps ;
- 3- l'impact à long terme de l'exploitation et du stockage sur le comportement mécanique et l'intégrité des terrains de recouvrement jusqu'à la surface du sol ;
- 4- le comportement à long terme des ouvrages d'accès (galeries et puits) et des sondages ;
- 5- le comportement à long terme des Moyens de Maîtrise des Risques (MMR) proposés.

Tout en s'appuyant sur les différentes études réalisées, ce document se veut synthétique et s'attache à présenter leurs principales conclusions, sans présenter en détails leur contenu technique.

¹ D'ailleurs, pour les INB, le pétitionnaire (qui doit fournir les deux types d'études) réalise l'étude de dangers « à partir des principes énoncés dans le rapport préliminaire de sûreté » (article 3.15° du décret n°63-1228 du 11 décembre 1963).

2. DESCRIPTION SOMMAIRE DE L'EXPLOITATION ET DU STOCKAGE

2.1 FORMATIONS GÉOLOGIQUES ET EXPLOITATION MINIÈRE

Nous allons nous contenter ici d'un rappel sommaire des principales caractéristiques géologiques des formations et de l'exploitation des MDPA qui sont en lien direct avec cette étude de « sûreté ». Une description plus détaillée étant déjà présentée dans d'autres parties de ce dossier, il n'y a pas lieu qu'elle soit répétée ici.

L'exploitation des MDPA concerne deux secteurs distincts, Est et Ouest, sans aucune communication. Le volume des vides créés par l'exploitation est de 200 millions m³ et 70 millions m³ respectivement.

Le bassin de Mulhouse (Figure 1) est constitué de trois zones salifères d'âge tertiaire (Sannoisien). Chaque zone comporte une ou deux séries salifères stratifiées, formées de bancs de sel et d'insolubles marno-anhydritiques. Ce litage relativement fin est susceptible de favoriser, nous le verrons plus loin, le décollement du toit des ouvrages réalisés à certains niveaux. Les deux couches potassiques (sylvite, KCl), exploitées aux MDPA se trouvent dans la série Sel IV, au sein du salifère supérieur : il s'agit de la Couche Inférieure (CI), d'épaisseur² 4 m et de la Couche Supérieure (CS), d'épaisseur 1,5 m. Ces couches ont été exploitées pendant près d'un siècle (1910-2002), par la méthode des longues tailles avec foudroyage. La profondeur de l'exploitation varie, selon le secteur, entre 500 m et plus de 1000 m.

La zone de stockage de StocaMine se trouve à environ 550 m de profondeur à 23-25 m en dessous du niveau exploité. Elle est accessible par les puits Joseph et Else, les seuls non remblayés à ce jour. Aucune faille n'affecte le secteur concerné par le stockage.

Dans le secteur du stockage, le toit du sel se trouve à 300 m de profondeur (Figure 2). Le pendage est de 6 à 8° N-NW. Le recouvrement de sel est constitué des formations du Stampien et du Chattien (marnes, anhydrite, gypse et grès), formations surmontées d'environ 35 m de terrains quaternaires au sein desquels se trouve la nappe d'Alsace (une trentaine de mètre d'épaisseur). La surface du sol se trouve à +270 m NGF.

Rappelons que l'exploitation de sel par la méthode des longues tailles avec foudroyage est très rare dans le monde. Ce fait tient à la crainte d'une invasion de la mine par l'eau au travers de la fracturation du recouvrement induite par le foudroyage. De ce point de vue, les méthodes d'exploitation partielle apparaissent plus rassurantes dans la mesure où elles sont en principe conçues et dimensionnées pour assurer la stabilité du recouvrement, à l'aide des piliers stables.

² il s'agit des valeurs moyennes dans le secteur exploité ; l'épaisseur réelle de la Couche Inférieure varie de 4 à 6 m et celle de la Couche Supérieure est comprise entre quelques centimètres et 2 m.

En dépit d'une exploitation par longues tailles très étendue, opérée pendant près d'un siècle, force est de constater que les Mines de Potasse d'Alsace n'ont jamais été victimes d'une invasion d'eaux souterraine, à la différence de ce qui s'est produit dans de nombreuses mines de sel à travers le monde. Pourtant, des niveaux aquifères, plus ou moins débiteurs d'eau existent bien dans le recouvrement. Un seul présente un fort hydrodynamisme et est exploité pour l'Alimentation en Eau Potable (AEP) : c'est la nappe d'Alsace, située près de la surface du sol. Le fait que cet aquifère ou d'autres niveaux plus ou moins débiteurs d'eau n'aient jamais été mis en communication hydraulique avec l'exploitation prouve que la fracturation générée par le foudroyage ne s'est jamais étendue jusqu'aux niveaux aquifères. L'étanchéité hydraulique des terrains de recouvrement est donc globalement assurée par un ensemble de terrains marneux réputés imperméables. Certes, cette caractéristique a été altérée localement sur quelques mètres à quelques dizaines de mètres, au toit de l'exploitation (zone très affectée par le foudroyage) mais le reste du recouvrement n'a subi qu'un affaissement souple. Ce phénomène bien que d'une amplitude importante (5,5 m au maximum) ne s'est pas traduit par une fracturation pouvant mettre en communication les aquifères avec l'exploitation. Ce fait revêt une importance majeure pour la sûreté du stockage de StocaMine puisque le bon fonctionnement de la barrière géologique naturelle est bien assuré.

Les seules voies de communication hydraulique entre les aquifères et le stockage sont les puits d'accès dont la parfaite étanchéité ne peut être garantie à long terme. C'est une hypothèse admise dans toutes les études hydrogéologiques et d'envoyage de StocaMine, reprise également dans cette étude de sûreté.

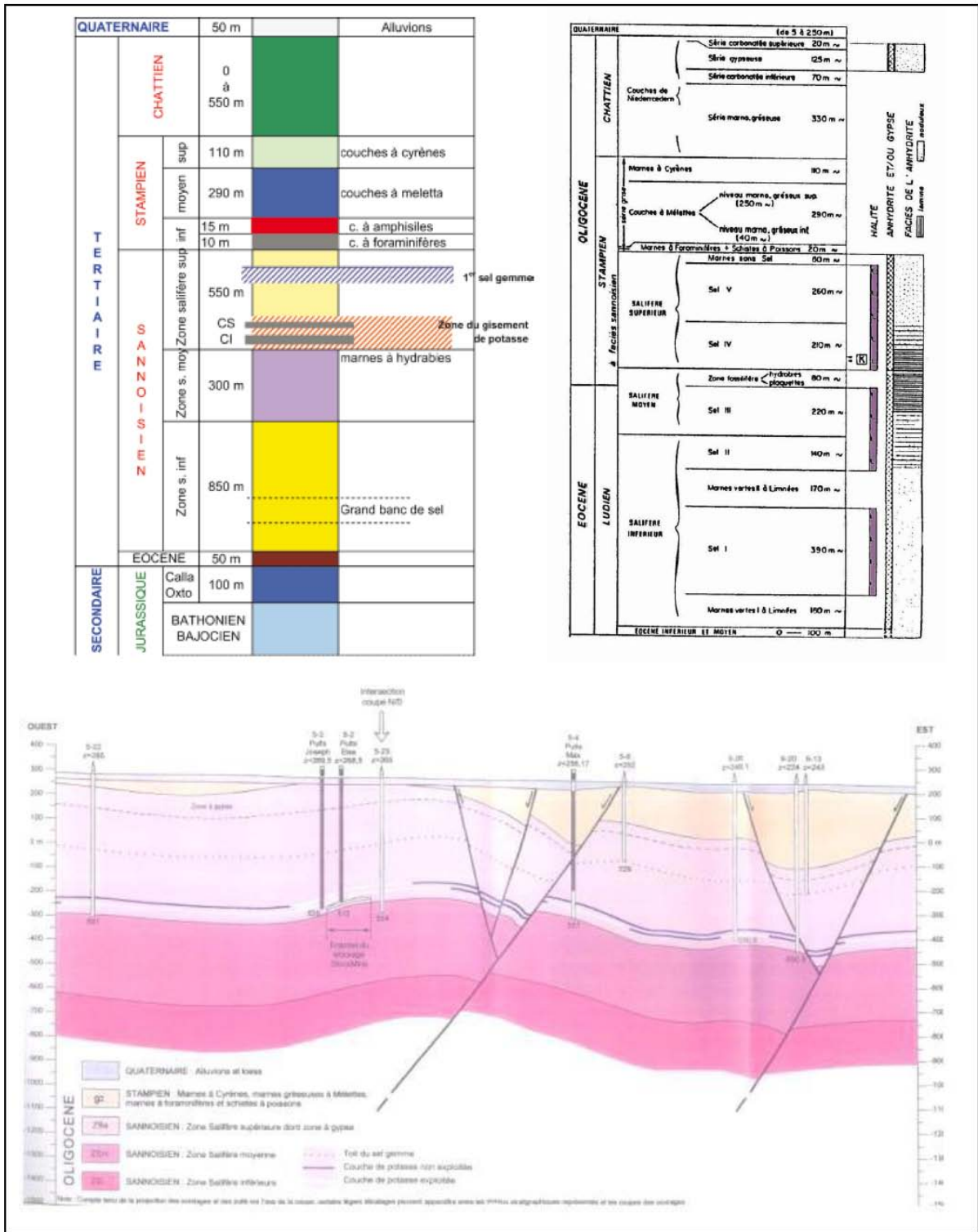


Figure 1: Coupes géologiques des terrains aux MDPAs

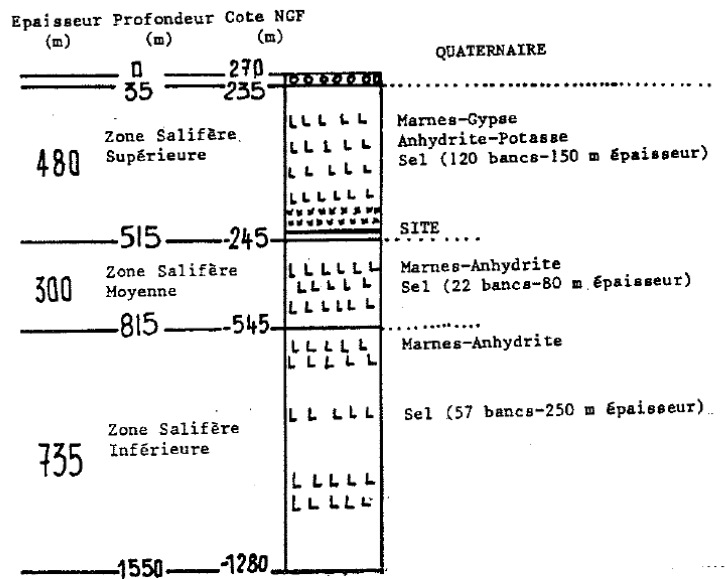


Figure 2: Coupe de terrains au niveau de StocaMine (extraite du rapport de Combes et Ledoux, 1996).

2.2 LE STOCKAGE

Le stockage de déchets industriels a été réalisé dans une zone excavée spécialement à cette fin, par la méthode de chambres et piliers, sur une superficie de 700 m x 600 m. Les piliers sont de section carrée de 20 m x 20 m (Figure 4). Les chambres ont une largeur de 5,5 m et une hauteur de 2,8 m. Le taux de défrêtement (surface excavée/surface totale) est de 38%. Le stockage est accessible par des voies doubles ou triples, de 4 m de largeur, séparées par des piliers de 3 m de largeur (valeurs moyennes).

La zone occupée par le stockage est constituée de blocs traversés par des allées de 230 m de longueur et des recoupes de 70 m de longueur, délimitant 27 piliers (9 x 3). Les blocs sont numérotés (Figure 3), dans l'ordre chronologique, 11-21 puis 12-22, 13-23, 14-24 et 15-25, 16-26. Ces quatre derniers blocs ont été réalisés 2 m plus bas que les précédents. Ils sont marqués (nous le verrons plus loin) par un toit très lité affecté par un décollement des bancs. La distance entre le niveau du stockage et les terrains de foudroyage (ancienne exploitation de potasse) est donc de 23 m pour les 8 premiers blocs et de 25 m pour les derniers.

Notons également la présence d'un stot au niveau de l'exploitation, localisé au-dessus du stockage (Figure 5). Il s'agit d'une partie non exploitée, alors qu'ailleurs les deux couches de KCl étaient exploitées par la méthode de longues tailles avant de procéder au foudroyage du toit (par retrait du soutènement). Ce stot est à l'origine d'une concentration des contraintes au niveau du stockage, d'après la modélisation géomécanique réalisée par l'INERIS [53].

Un incendie a eu lieu dans le bloc 15, le 10 septembre 2002 durant environ 3 mois. Il a conduit à l'arrêt définitif du stockage, en septembre 2003. L'influence de cet incendie sur l'état de stabilité du stockage a fait l'objet d'une modélisation thermo-mécanique réalisée par l'INERIS [53].

Rappelons que les blocs 16 à 26 ne contiennent donc pas de déchets et que le bloc 15 n'a été que très partiellement rempli. Il correspond donc au seul bloc du stockage situé dans le secteur plus profond, à 25 m en dessous du niveau exploité

Le volume total des déchets stockés à StocaMine est de 44000 m³ sur les 320000 m³ initialement prévus.

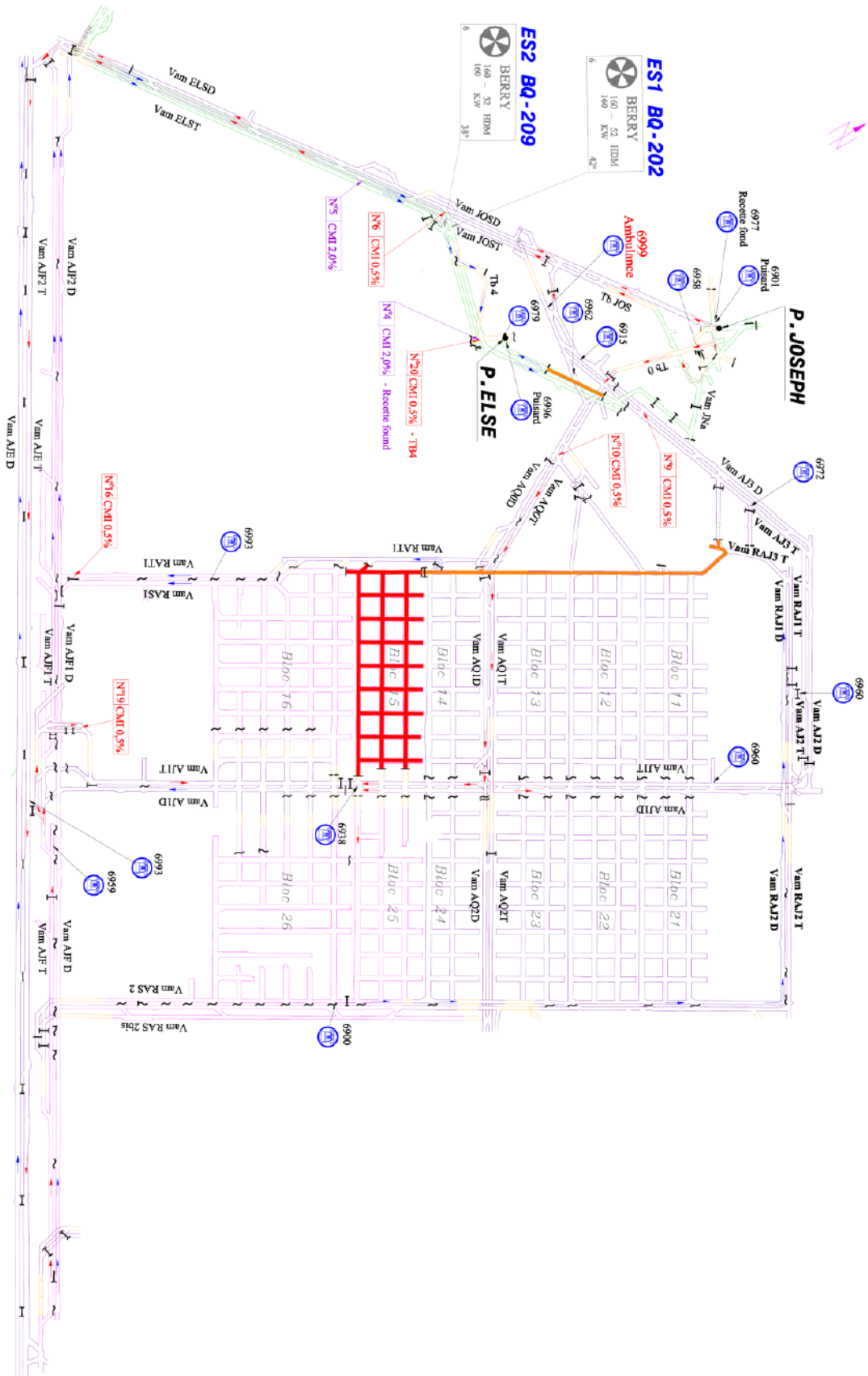


Figure 3: Vue en plan du secteur de stockage de StocaMine (document StocaMine)

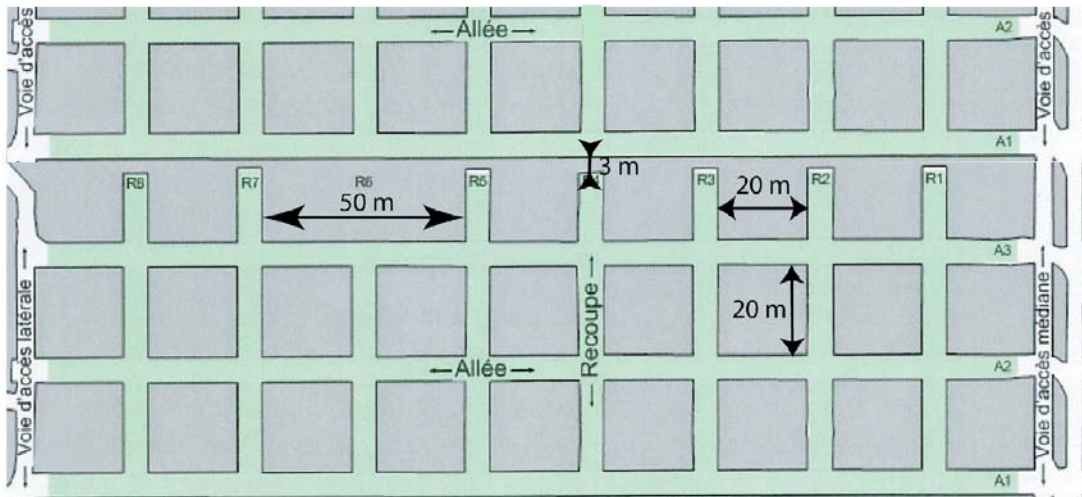


Figure 4 : Plan d'un bloc de stockage et dimensions élémentaires

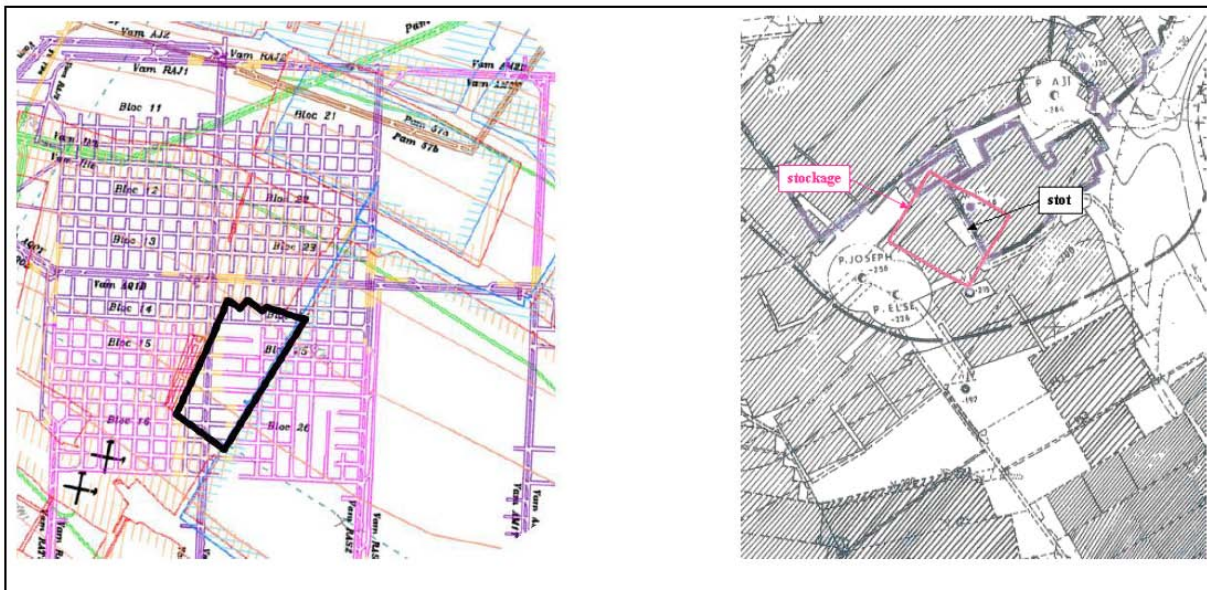


Figure 5: Localisation du stot à 25 m au-dessus du Stockage

3. DEMARCHE ADOPTÉE DANS CETTE ETUDE

De par l'importance de l'échelle de temps intervenant dans l'évaluation de la sûreté à long terme de tout stockage souterrain (plusieurs milliers d'années), le recours à une modélisation est inévitable. Le modèle employé doit cependant faire l'objet d'une validation préalable, en s'appuyant sur toutes les données et observations disponibles. Cette démarche a bien été mise en œuvre pour l'étude de StocaMine, en s'appuyant sur de nombreuses mesures in situ réalisées sur une dizaine d'années. Il s'agit en particulier des mesures de convergence des galeries de stockage et des mesures d'affaissement de la surface du sol, réalisées sur plusieurs années.

Des modèles numériques (méthode des éléments finis), en 3D (Figure 6) et en 2D (Figure 7) ont été mis en œuvre par l'INERIS [53] pour l'étude géomécanique du stockage. Ils ont permis de prendre en considération les caractéristiques géométriques (chambres, piliers, voies doubles), géologiques (sel, terrains de recouvrement) et de l'exploitation (longues tailles en 1 ou 2 couches, foudroyage, stots).

Par ailleurs, des lois rhéologiques, validées par des travaux scientifiques reconnus sur le plan international, ont été introduites dans ces modèles. Elles tiennent compte du comportement mécanique spécifique des évaporites (notamment le sel et la potasse), très marqué par le fluage. En effet, il est unanimement admis par la communauté scientifique que les évaporites se comportent comme un fluide très visqueux : tout ouvrage réalisé dans ce type de formations est condamné à se fermer entièrement à long terme. Ce fait, nous le verrons plus loin, a une forte incidence sur la sûreté à long terme du stockage puisqu'il impacte non seulement la stabilité mécanique des ouvrages souterrains mais aussi la capacité de confinement du milieu géologique et le risque de transport de polluants vers l'extérieur. **En effet la fermeture progressive de tous les espaces vides souterrains (ouvrages, terrains de foudroyage) sous l'effet du fluage des terrains salifères conduit, à terme, à une expulsion de la saumure présente dans ces vides, consécutivement à leur ennoyage. Ce processus n'est pas propre aux MDPA : il a lieu dans toute mine de sel ennoyée naturellement ou d'une manière accidentelle. Les puits d'accès peuvent constituer des chemins potentiels d'infiltration d'eau. Même s'ils ont été soigneusement remplis par des matériaux étanches, une infiltration d'eaux aux différentes interfaces, en particulier le long de la paroi rocheuse, ne pourrait être exclue à long terme. Cette hypothèse est d'autant plus plausible que la dissolution du sel au toit de la formation salifère contribue à la création d'un chemin de communication entre les aquifères et les vides souterrains. Privilégié par l'ennoyage, ce chemin peut aussi être emprunté par la saumure expulsée par la fermeture progressive des vides (fluage du sel). Il constitue donc a priori une voie de transport de produits contaminés dans le cas d'un stockage de déchets.**

Ce scénario a été retenu par l'INERIS quelque soit le site de stockage et indépendamment de la qualité du traitement des puits et du scellement. C'est le cas également des deux sites retenus en Allemagne dans l'étude de la comparaison des différents scénarios de devenir de stockage de StocaMine. Il s'agit des sites de stockage de déchets de Heilbronn et de Herfa-Neurode. Bien que ces sites soient considérés, en Allemagne, comme tout à fait étanches vis-à-vis des eaux souterraines, de par leur qualité de leur scellement, cette hypothèse d'étanchéité parfaite sur du très long terme n'a pas été retenue par l'INERIS et par la grande majorité des membres du Comité de Pilotage « StocaMine ».

Cette vision a guidé les travaux de modélisation de l'INERIS : la loi rhéologique des terrains salifères est celle de Norton (ou Norton Hoff), employée dans de nombreux pays, en particulier dans les contextes du stockage de déchets radioactifs et du stockage d'hydrocarbures en cavités salines. Bien que les études géomécaniques antérieures, réalisées par l'Ecole des Mines de Paris (Vouille, 1990, Hadj Hassen et Tijani, 2006 et 2009) aient été basées sur un modèle rhéologique différent (celui de Lemaitre), l'INERIS a justifié son choix par les résultats des mesures de convergence de StocaMine. En effet, comme nous le verrons plus loin, ces mesures mettent en évidence que la convergence évolue systématiquement à vitesse constante (fluage dit stationnaire) ce qui est conforme au modèle de Norton alors que le modèle de Lemaitre considère une diminution progressive de la vitesse de fluage et conduit donc à une sous-estimation du processus de fermeture des ouvrages souterrains.

Outre le fluage des évaporites, la modélisation réalisée par l'INERIS tient compte de la fissuration des terrains (endommagement). Les paramètres des modèles utilisés ont été caractérisés à partir de résultats de nombreux essais de laboratoire réalisés sur le sel des MDP, à proximité du site du stockage. Ces essais très précis et complets ont été conduits à l'Ecole Polytechnique, dans les années 1990, dans le cadre de projets de recherche européens, menés en collaboration avec l'ANDRA. Ces travaux ont fait l'objet de trois thèses de doctorat (Kazan 1994, Thorel 1994 et Cosenza 1996) et de plusieurs publications scientifiques.

Ainsi la prévision à long terme du stockage, présentée dans la suite, s'appuie sur le trépied «essais de laboratoire - modèle numérique - données in situ » reposant sur un socle scientifique solide, validé à l'échelle internationale.

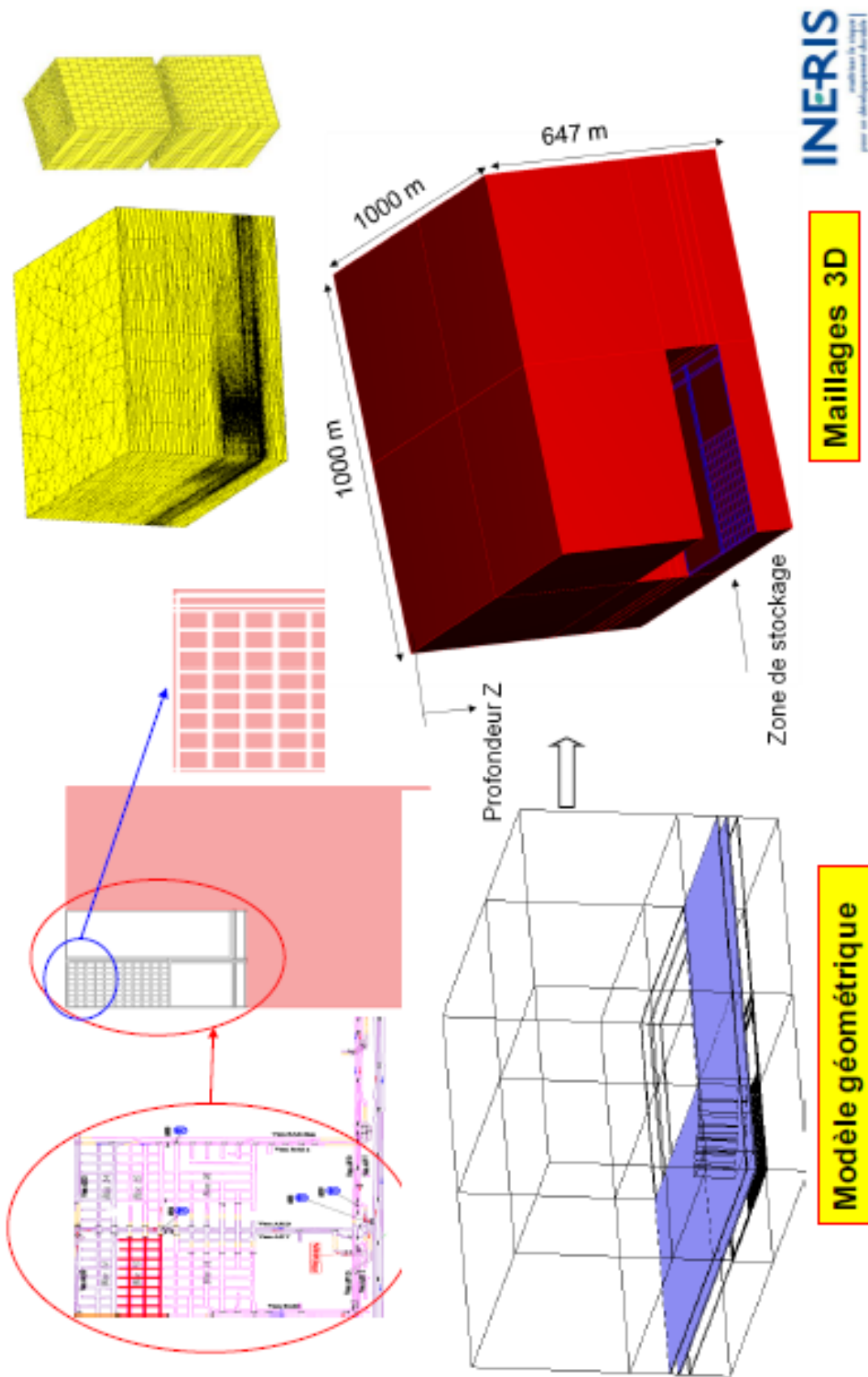


Figure 6: Modélisation 3D du stockage de StocaMine (INERIS, 2010)

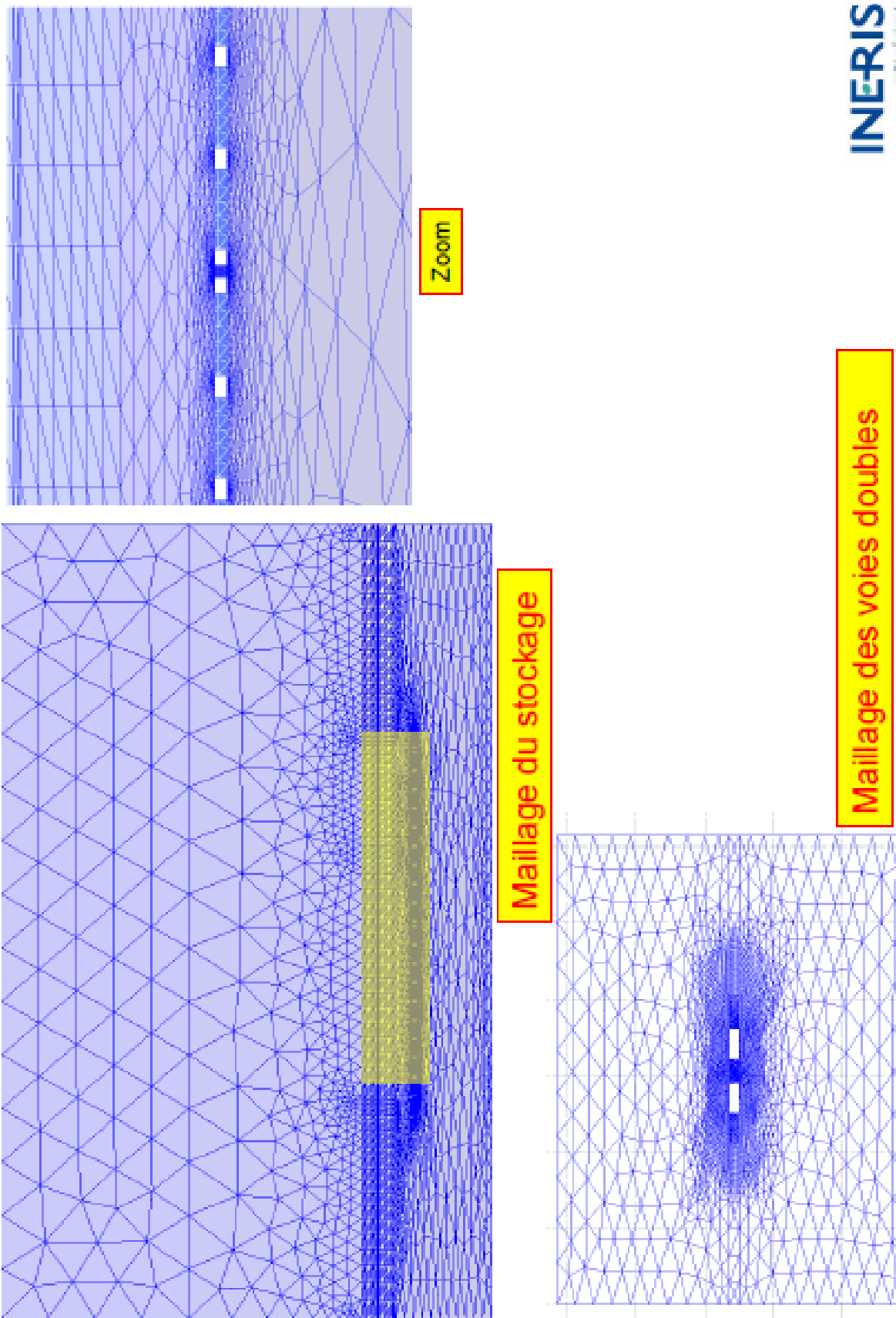


Figure 7: Modélisation 2D du stockage de StocaMine (INERIS, 2010)

4. COMPORTEMENT MÉCANIQUE DES DIFFÉRENTS OUVRAGES

L'évolution dans le temps de la stabilité et du comportement mécanique du milieu d'accueil du stockage de StocaMine tient aux comportements des différents éléments constitutifs de ce milieu, à savoir :

- a- le stockage constitué des chambres, des piliers et des voies d'accès doubles ou triples ;
- b- le réseau des galeries d'infrastructure des MDPA, réalisées en voies double, à différents niveaux d'exploitation minière ;
- c- les chantiers exploités par la méthode des longues tailles avec foudroyage ;
- d- les puits d'accès ;
- e- les sondages réalisés pour la reconnaissance géologique ou pour le dégazage du grisou.

Le comportement mécanique peut être analysé de deux points de vue :

- 1- l'impact du fluage de la formation salifère, notamment le sel gemme sur la fermeture progressives des galeries et la compaction des terrains de foudroyage et des déchets ;
- 2- la stabilité mécanique des galeries, du stockage (piliers, chambres, toit), des stots et des terrains de recouvrement.

Ces aspects, plus ou moins liés, revêtent une importance majeure dans le contexte de StocaMine puisque, d'une part, l'imperméabilité du milieu géologique ne doit pas être compromise par un endommagement étendu des terrains, et d'autre part, l'impact du fluage du sel sur l'expulsion de la saumure contaminée doit être maîtrisé sur le long terme. On conçoit l'importance accordée à l'étude du processus de fluage dans la partie qui suit.

4.1 FERMETURE PROGRESSIVE DU STOCKAGE

Le comportement du stockage fait l'objet d'auscultation depuis une dizaine d'années. Le rapprochement progressif des parements des galeries desservant le stockage est mesuré en 44 points. On dispose de courbes d'évolution de la convergence verticale ou horizontale, ce qui constitue une source d'information importante et précise sur le comportement du stockage et son évolution dans le temps.

Toutes les mesures montrent un rapprochement lent des parements des galeries, à vitesse constante (Figure 8). Cette évolution est tout à fait conforme au comportement du sel gemme modélisé par la loi de Norton (fluage dit stationnaire). Les vitesses les plus élevées sont obtenues dans les galeries centrales (Figure 9) alors que le fluage est plus lent sur les extrémités du stockage (effet de bords). La valeur moyenne de la vitesse de fermeture verticale du stockage est de 0,92% par an soit 2,6 cm/an, compte tenu de la hauteur des galeries qui est de 2,8 m, en moyenne. Cette vitesse est valable pendant toute la période précédant le contact « toit-déchets ».

En prenant une hauteur de 0,8 m en moyenne pour la partie laissée vide au-dessus des déchets dans les différents blocs, le temps nécessaire pour que le fluage du sel conduise au contact entre le toit des galeries et les déchets est estimé entre 10 et 30 ans (à compter du début 2011) pour les différents blocs contenant les déchets. Il ne restera alors que l'espace vide entre les fûts et à l'intérieur des fûts et des big-bags (porosité des déchets). Le volume de ces vides peut être estimé à environ 7000 m³ ce qui correspond à 1/3 du volume des déchets stockés (22000 m³ pour 44000 tonnes).

Après le contact « toit-déchets », le volume des vides résiduel des déchets diminuera très lentement sous l'effet du fluage du sel qui ralentira, lui-aussi, puisque les déchets compactés deviendront de plus en plus raides et résisteront au fluage en exerçant une pression au toit et au mur du stockage ainsi qu'aux parements des piliers. La vitesse de convergence diminuera alors sensiblement dans le temps mais ne s'annulera qu'à très long terme (sur plusieurs milliers d'années) lorsque la pression développée par la compaction des déchets deviendra égale à la contrainte naturelle régnant dans les terrains (soit 11-12 MPa, au niveau du stockage, à 530 m de profondeur).

Après l'envoyage du stockage (dans trois siècles), la saumure introduite dans les vides résiduels des déchets sera expulsée vers les puits d'accès, les plus proches du stockage (Joseph, Else, Amélie I, Amélie 2 et Max). Contaminée par les déchets, cette saumure sera diluée dans celle en provenance directe des tailles, expulsée, elle aussi, par la compaction des terrains de foudroyage. Ce phénomène est considérablement ralenti et atténué en présence de barrières à très faible perméabilité (cf. les résultats des études sur les moyens de maîtrise de risques).

Ainsi le risque de transport des contaminants vers la biosphère doit être évalué compte tenu de l'évolution des vitesses de compaction des terrains foudroyés et des déchets. Ces vitesses ont été estimées à partir du modèle ajusté sur les mesures de convergence. Les résultats obtenus ont permis de calculer les concentrations des contaminants susceptibles d'atteindre la nappe d'Alsace, dans les différents scénarios étudiés.

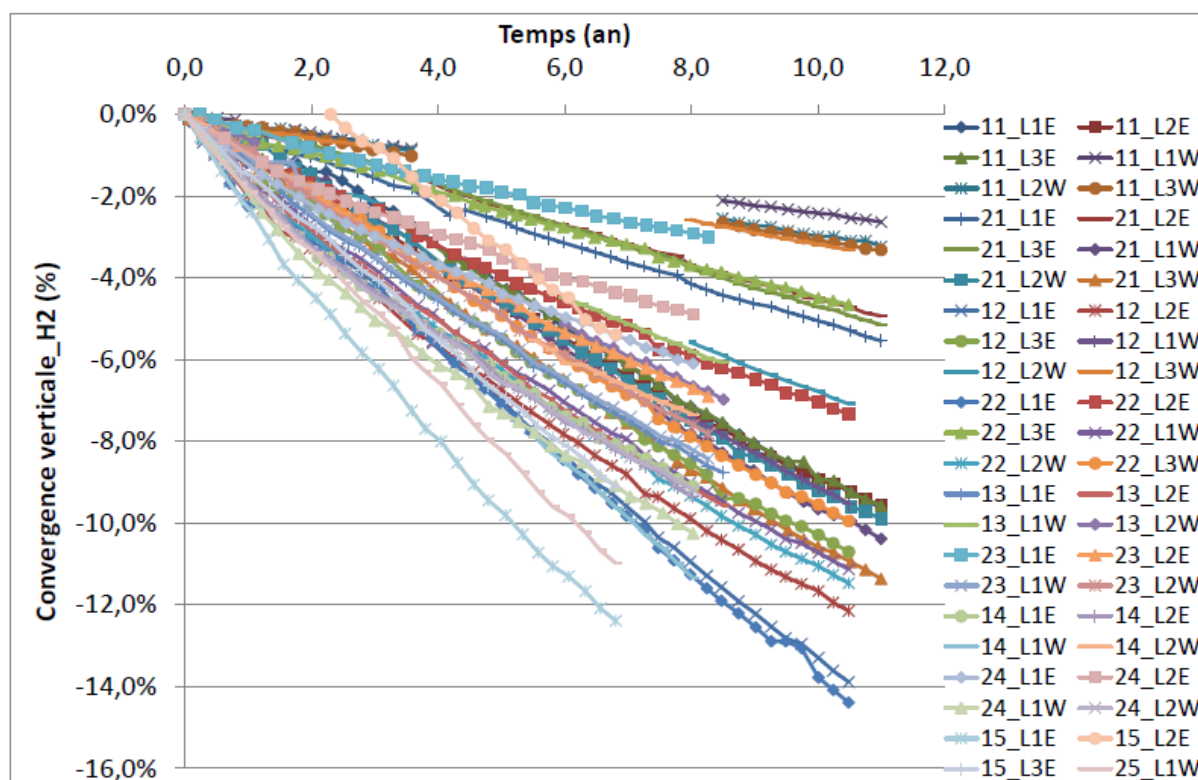


Figure 8: Evolution linéaire de la convergence dans le temps, mise en évidence par l'ensemble des mesures (INERIS,2010).

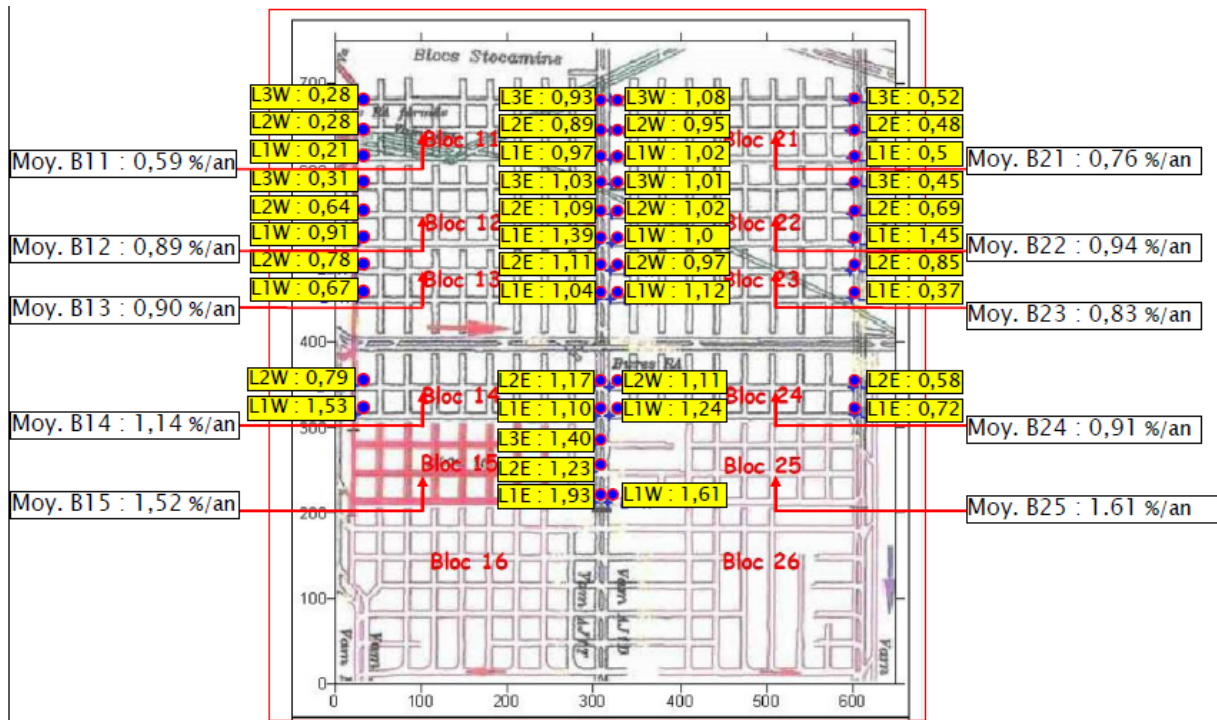


Figure 9: Vitesses de convergence (% par an) mesurées dans les différents blocs du stockage de StocaMine (INERIS,2010).

4.2 CONVERGENCE DES VOIES DOUBLES

Les résultats de la modélisation des voies doubles indiquent une vitesse de convergence de 0,9% par an à la profondeur du stockage, valeur sensiblement identique à la vitesse moyenne actuelle du fluage du stockage. La vitesse de fluage des galeries dépend fortement de la profondeur (effet conjugué de l'état de contrainte et de la température résultant du gradient géothermique). La Figure 10 montre que le temps nécessaire à la fermeture d'une voie double varie de quelques années à 1000 m de profondeur à deux siècles si la profondeur est inférieure à 500 m (niveau des ouvrages les moins profonds situés au-dessus du stockage).

Il s'agit d'une fermeture mécanique et non hydraulique. Cela signifie que l'ouvrage rempli de blocs déformés n'est plus accessible à l'homme mais peut l'être à la saumure au travers des espaces interstitiels disponibles entre les blocs déformés. La porosité et la perméabilité des galeries mécaniquement fermées ne sont donc pas nécessairement nulles. De ce fait, **les galeries d'infrastructures des MDPA constituent potentiellement des chemins de transit de la saumure pendant et après l'ennoyage.**

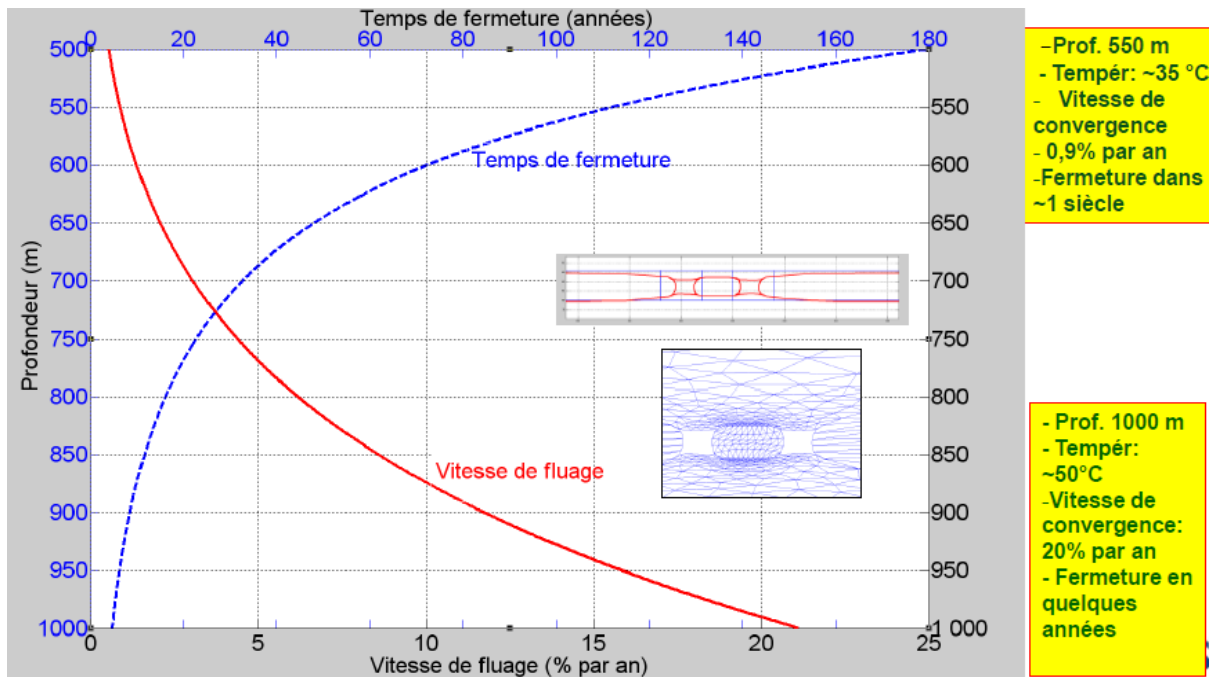


Figure 10: Estimation du temps de fermeture des voies doubles en fonction de la profondeur (INERIS,2010).

4.3 COMPACTION DES TERRAINS FOUDROYÉS

Dans une exploitation par longues tailles, comme celle des MDPAs, le retrait du soutènement conduit au foudroyage des terrains de toit. Ce phénomène se traduit par la descente de tout le recouvrement jusqu'à la surface du sol (Figure 11).

Les terrains du toit immédiat de l'exploitation sont très fracturés (sur quelques mètres à quelques dizaines de mètres selon l'ouverture de la taille) alors que le haut-toit subit une déformation souple sans cassure.

Une cuvette d'affaissement apparaît alors en surface. Son extension et son amplitude dépendent en particulier du ratio « largeur de l'exploitation / profondeur »

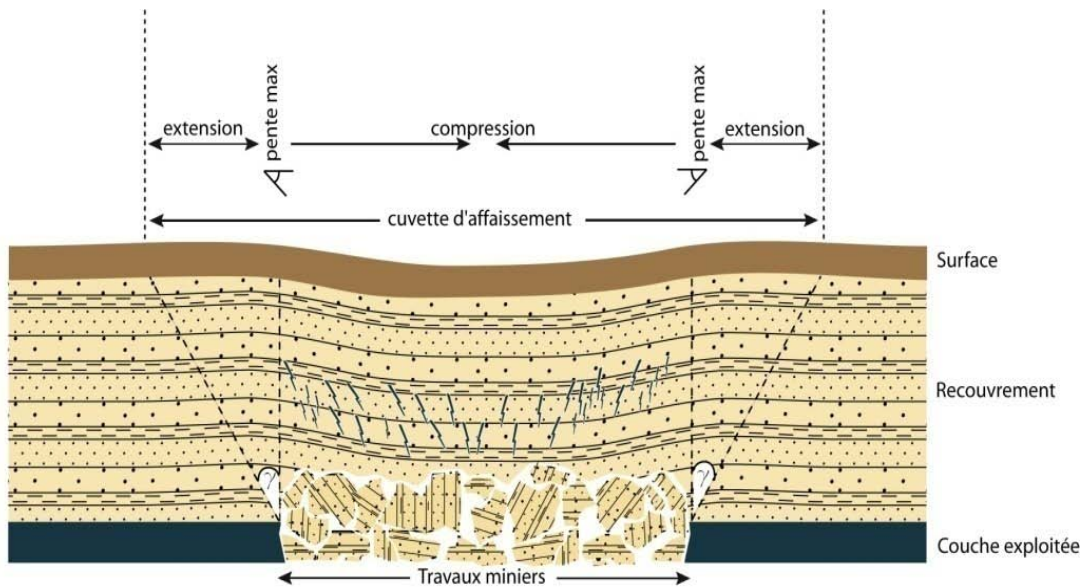


Figure 11: Schéma d'affaissement lié à une exploitation minière par longues tailles avec foudroyage (source INERIS).

Les courbes d'affaissement présentées dans le mémoire n° 5 des MDPa ont une allure classique en trois phases : démarrage, accélération brutale et évolution résiduelle. Cette dernière phase commence quelques années après l'exploitation et se poursuit jusqu'à l'arrêt du processus de compaction (consolidation) des terrains foudroyés. Ce processus ne s'arrête, dans les formations salifères, qu'après une compaction parfaite (absence de tout espace vide) sur du très long terme (plusieurs milliers d'années).

Toutes les courbes d'affaissement disponibles mettent en évidence une évolution résiduelle linéaire sur la période de mesure qui ne dépasse pas une dizaine d'années (Figure 11 et Figure 12). Elles sont caractérisées par une vitesse d'affaissement de 0,7 à 1 cm/an ce qui, compte tenu de l'ouverture de l'exploitation (4 à 5,5 m suivant que la couche inférieure ou les deux couches de potasse ont été exploitées), revient à une vitesse relative de 0,1 à 0,25% par an. Cette vitesse étant susceptible de diminuer dans le temps consécutivement à la compaction de la taille, on retiendra une valeur de 0,1% par an (borne inférieure des mesures maintenue constante à moyen terme) pendant toute la durée d'envoyage (quelques siècles).

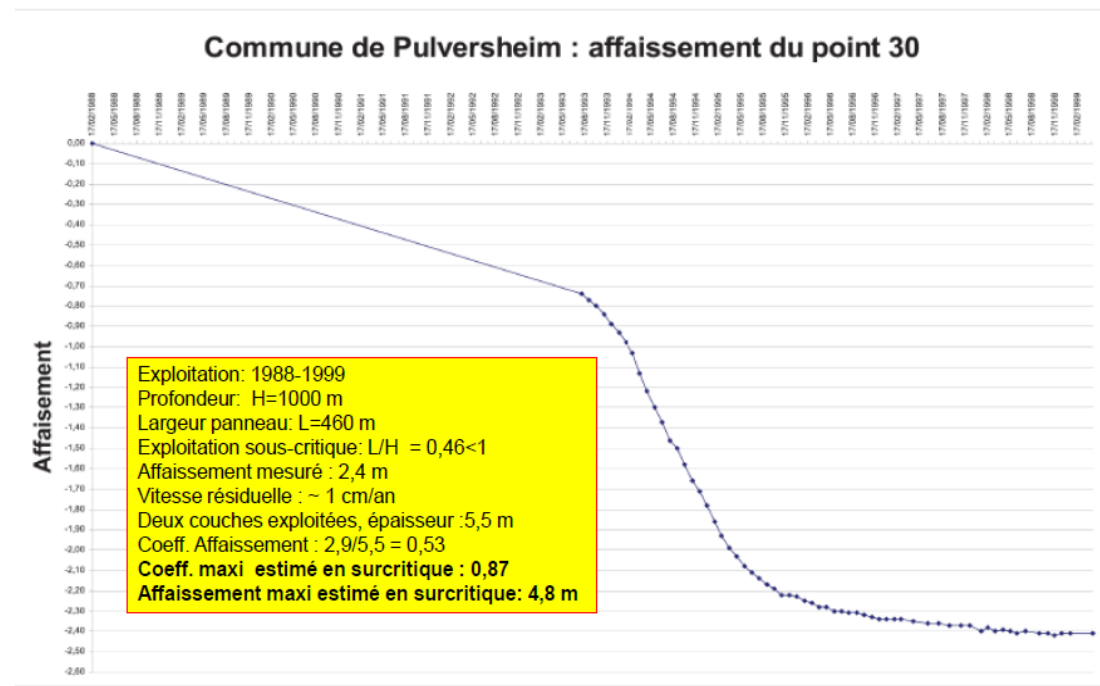
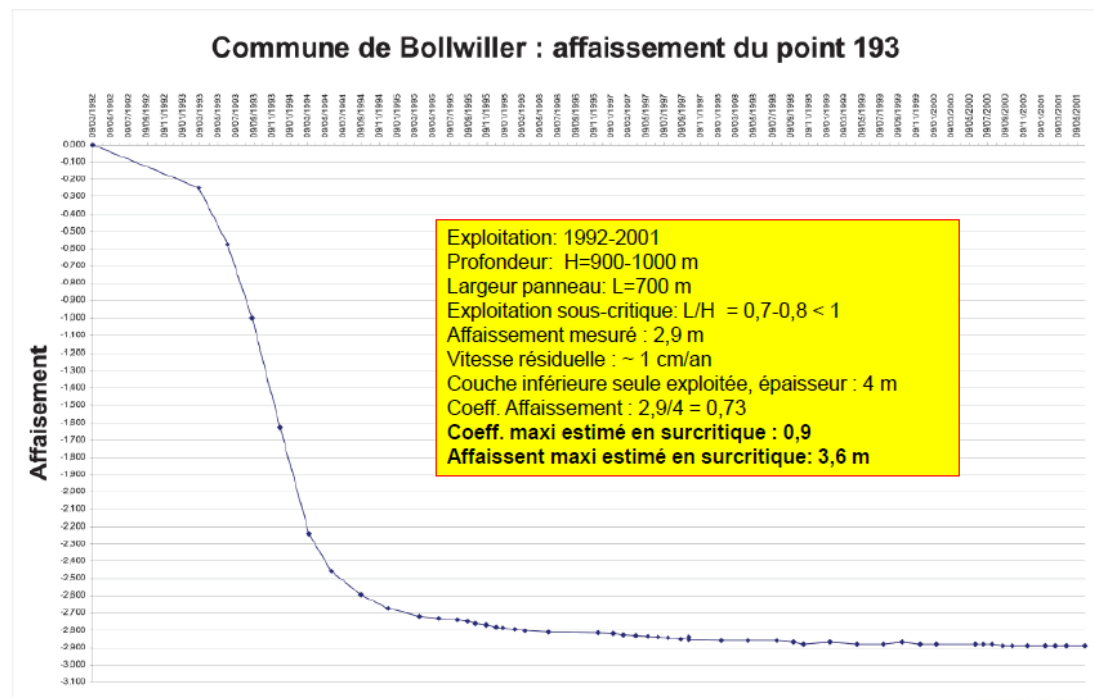


Figure 12 : Exemples d'évolution dans le temps d'affaissement lié à l'exploitation des MDPA (affaissement en m, Mémoire n°5 des MDPA)

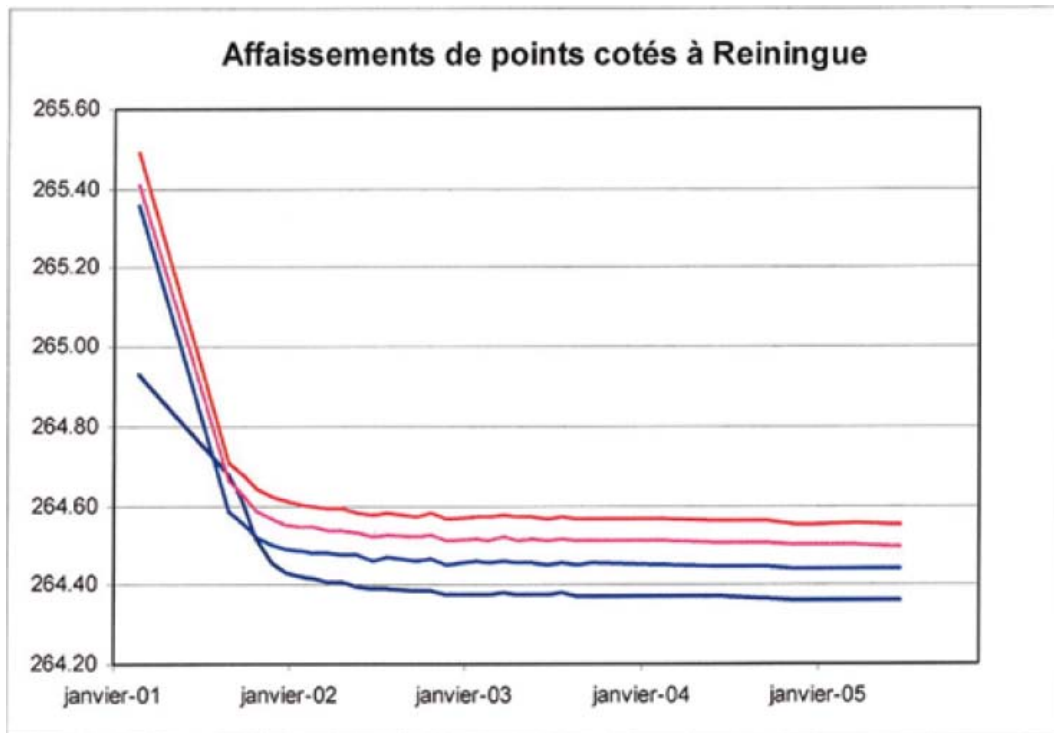


Figure 13: Evolution de l'affaissement de la surface à Reiningue (extrait du rapport BRGM, 2007, en annexe du Mémoire 5 de StocaMine sur l'affaissement).

4.4 IMPACT DE L'ENNOYAGE SUR LE FLUAGE

L'influence de l'ennyoyage sur le fluage du sel se déduit facilement de la loi rhéologique de ce matériau. La pression exercée par la saumure sur la paroi des structures souterraines fait diminuer d'un ordre de grandeur la vitesse de fluage. Ainsi, à la fin de l'ennyoyage, la vitesse de convergence des voies doubles au niveau du stockage est estimée par l'INERIS à 0,1% par an alors que la vitesse de compaction des terrains de foudroyage vaut 0,01% par an. Cela signifie que la vitesse d'affaissement de la surface sera au plus de 1 mm/an ce qui est imperceptible et ne peut occasionner aucun impact sur la vulnérabilité des bâtiments et des structures dans la mesure où cet affaissement résiduel est relativement homogène (pas d'inclinaisons ou de déformations horizontales significatives).

Un autre phénomène lié à l'ennyoyage, rencontré au droit d'exploitations minières (y compris les mines de sel), est le soulèvement modéré de la surface du sol, du fait de la pression interstitielle développée dans des terrains de recouvrement dotés d'une perméabilité et d'une porosité accessible à l'eau. La poussée d'Archimède résultant de l'ennyoyage conduit à un soulagement des terrains et un soulèvement centimétrique à décimétrique de la surface du sol (en valeur relative par rapport au niveau préalablement affaissé). Ce phénomène s'arrête une fois que le niveau d'ennyoyage est stabilisé.

Le contexte géologique des MDPA n'est pas a priori favorable à un soulèvement sensible des terrains lié à l'ennoyage: la moitié du recouvrement est constituée de terrains salifères pratiquement imperméables et à porosité négligeable. Par ailleurs, l'essentiel du reste du recouvrement, situé entre le Quaternaire et le toit du sel (à 300 m de profondeur, dans le secteur de StocaMine) présente également des perméabilités et des porosités assez faibles. Le seul terrain doté d'une porosité et d'une perméabilité importantes est la formation alluviale du Quaternaire, d'une cinquantaine de mètre d'épaisseur, renfermant la nappe aquifère d'Alsace. Les formations plus ou moins perméables du recouvrement sont donc a priori saturées et n'ont jamais été désaturées pendant l'exploitation des MDPA. Elles ne seront donc pas affectées par l'ennoyage qui empruntera, très probablement, le seul chemin accessible à l'extrados des puits d'accès (chemin de plus faible résistance hydraulique).

Ces arguments permettent d'affirmer que l'ennoyage des MDPA ne provoquera pas de soulèvement sensible de la surface du sol. Ce phénomène sera sans conséquence pour la stabilité de la surface et n'aura aucun impact sur les bâtiments et les structures.

4.5 VOLUME DES VIDES RÉSIDUELS ET SON ÉVOLUTION DANS LE TEMPS

La durée de l'ennoyage et le processus de transport de contaminants dépendent aussi bien de la vitesse de fluage que du volume des vides susceptibles d'être remplis par la saumure. Le volume des galeries est négligeable devant celui créé par l'exploitation : le ratio initial (avant fermeture par fluage) est voisin de 5% mais dans la mesure où les galeries sont fermées au bout de deux siècles au maximum (à 500 m de profondeur), seuls les vides résiduels des terrains de foudroyage sont à prendre en compte sur du long terme.

Par ailleurs, l'essentiel du volume exploité par longues tailles est comblé rapidement par le foudroyage. Ce fait est attesté par la valeur du coefficient d'affaissement qui se traduit par le ratio « volume affaissé en surface du sol / volume exploité ». Ce coefficient est estimé à 0,9 par les MDPA, quelques années après l'exploitation. Cette valeur est jugée trop élevée par l'INERIS qui constate que des coefficients d'affaissement élevés ne peuvent être obtenus que sur des exploitations très étendues (qualifiées de sur-critiques où la largeur des panneaux exploités dépasse la profondeur) et situées à grande profondeur. Or 75% du volume exploité aux MDPA se trouve à moins de 650 m de profondeur. De plus, dans bien des cas, l'exploitation est sous-critique.

Ce constat a conduit l'INERIS à évaluer le coefficient d'affaissement en calculant le ratio « volume d'affaissement / volume exploité » à partir de la carte d'affaissement réalisée par le BRGM (Figure 14) et du plan du fond (Figure 15 et Figure 16) Compte tenu de la précision des cartes et des incertitudes liées au contour de la cuvette d'affaissement, cette étude a conduit à retenir une valeur moyenne du coefficient d'affaissement de 0,8 pour l'ensemble de l'exploitation, soit entre 0,7 et 0,9 pour des profondeurs variant de 500 à 1000 m. Ainsi, le volume des vides après le foudroyage correspond à 20% du volume exploité, soit 40 millions de m³ dans le secteur Ouest. Ce volume se réduira (par fluage) à environ 30 millions m³ à la fin de l'ennoyage (dans 3 siècles) Cette évolution se ralentira ensuite considérablement puisque la vitesse de compaction résiduelle diminuera d'un ordre de grandeur après l'ennoyage. On peut estimer, en première approximation, que tout le vide résiduel sera comblé au bout d'une centaine de siècles (10000 ans).

Il s'agit d'une tendance globale pour toute l'exploitation. Il faut se garder d'en déduire qu'il n'existe aux MDPA aucune taille ou galerie déjà fermée. Bien au contraire, des ouvrages anciens entièrement fermés ont été rencontrés par des travaux postérieurs ; les photographies de la Figure 17 en illustrent des exemples spectaculaires. Il s'agit probablement des phénomènes locaux liés aux ouvrages soumis à des fortes contraintes qui ne devraient pas être généralisés à l'échelle de l'ensemble de l'exploitation.

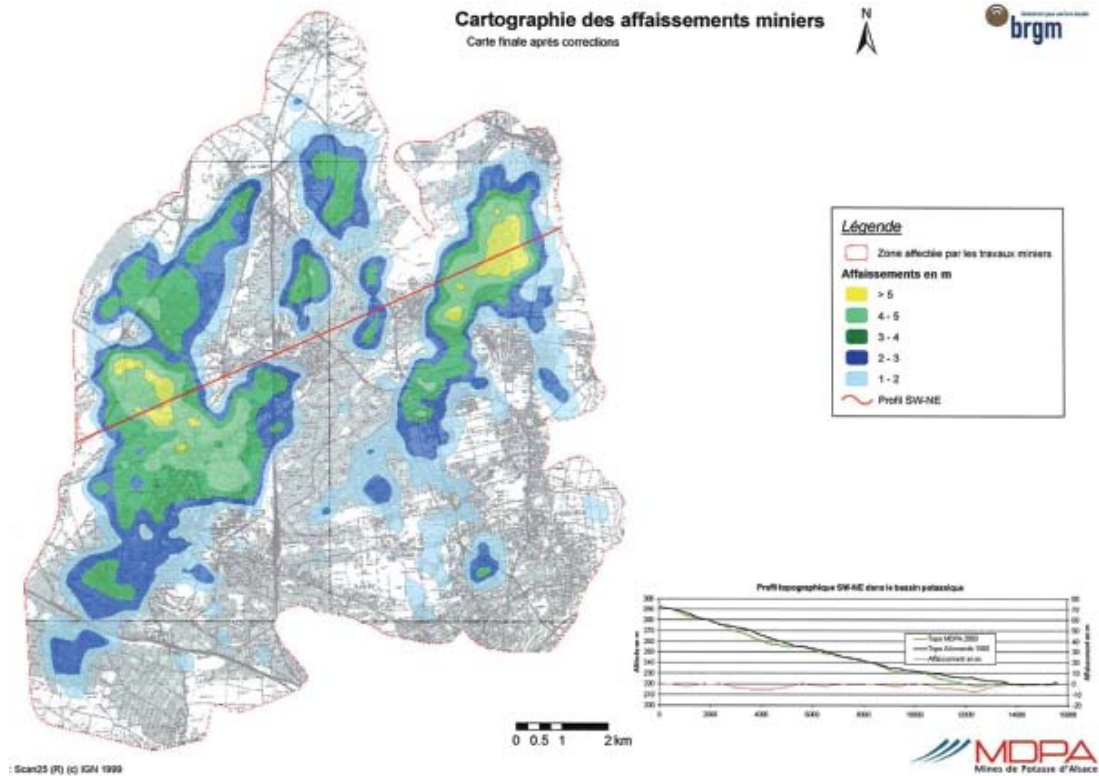


Figure 14: Carte d'affaissement des MDPA (rapport BRGM, 2007 en annexe du mémoire 5 des MDPA)

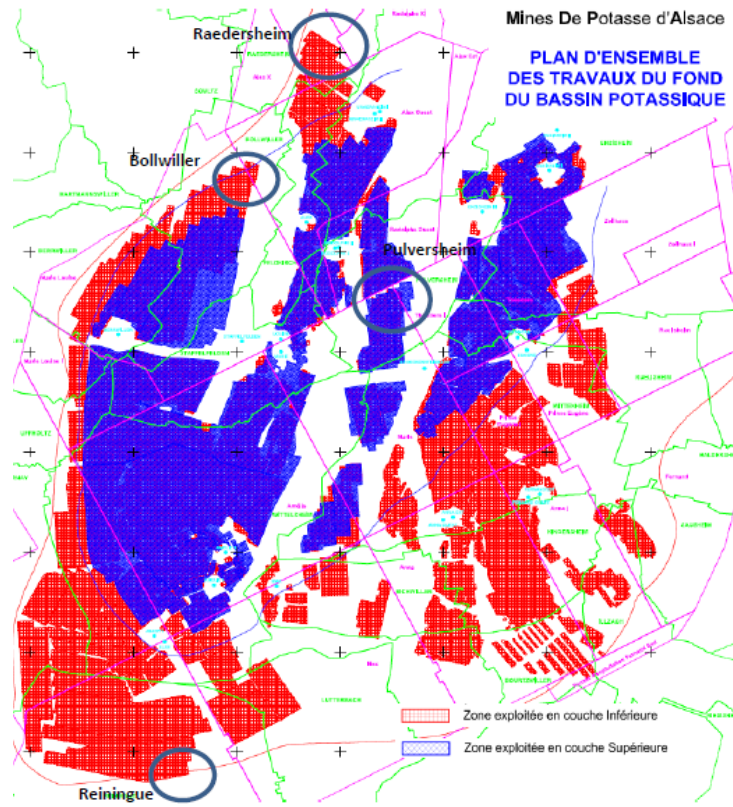


Figure 15: Plan du fond de l'ensemble de l'exploitation des MDPAs (document MDPAs)

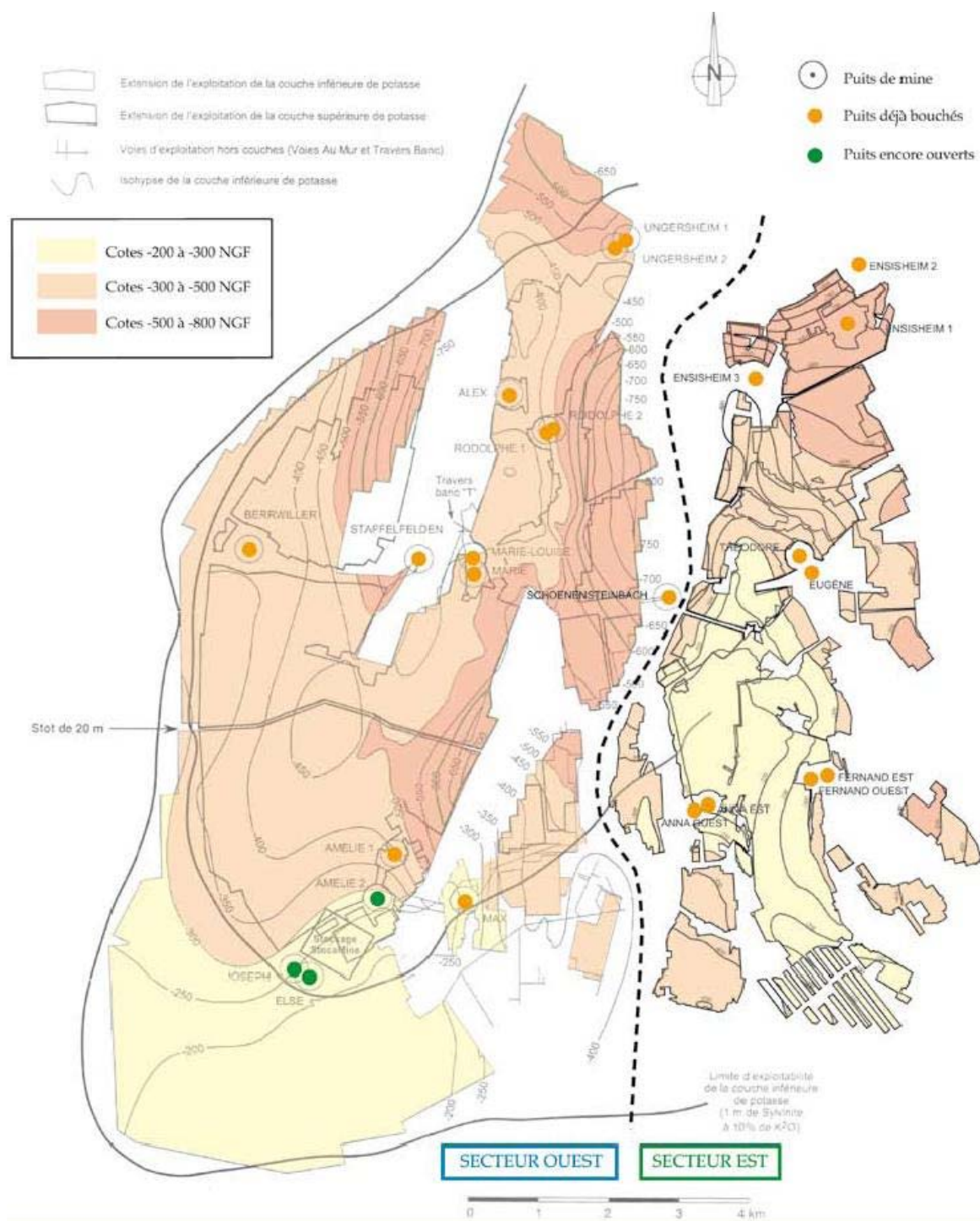


Figure 16: Le plan du fond des secteurs Est et Ouest des MDPA avec les isovaleurs de la cote NGF (Extrait du Mémoire 7.4 de StocaMine : Etude sur l'ennoyage des travaux souterrains).

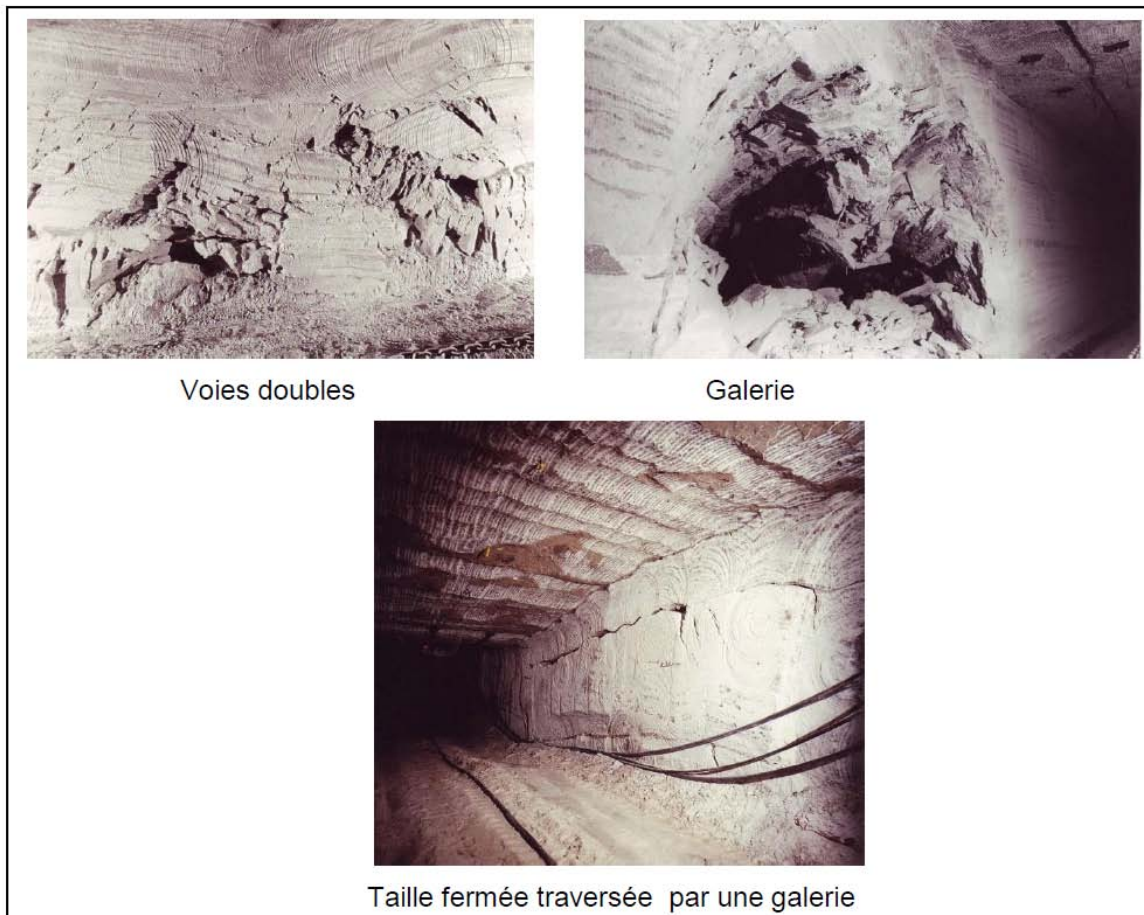


Figure 17: Fermeture des ouvrages souterrains aux MDPA (photographies extraites du rapport de Feuga, 2010).

4.6 STABILITÉ DES OUVRAGES SOUTERRAINS

Les résultats de la modélisation [53] sont en accord avec les observations sur le fait que les ouvrages du stockage sont affectés par plusieurs types d'instabilité géotechnique :

- 1- la fissuration / fracturation de piliers des voies doubles, plus ou moins étendue selon le pilier (Figure 18) ;
- 2- le soufflage du mur des galeries (Figure 19) ;
- 3- le décollement du toit du stockage, en particulier dans le secteur plus profond situé à -25 m du niveau exploité (Figure 19). Ce fait, qui tient au litage marqué du toit entre -23 m et -25 m (Figure 20), est responsable d'importants désordres au niveau du bloc 15;
- 4- le poinçonnement du stot existant au niveau exploité, responsable d'une forte concentration des contraintes dans les blocs sous-jacents ;
- 5- l'endommagement d'origine thermique lié à l'incendie du bloc 15.

Les dégradations visibles au fond sont susceptibles de s'intensifier dans les années à venir, pendant une période transitoire précédant la fermeture des ouvrages par le fluage du sel. En effet, le décollement important du toit de certains blocs rend difficile le retrait des déchets, au cas où cette option serait décidée. De même, l'état de ruine de certains piliers des voies doubles, qui tiennent actuellement par cerclage et boulonnage, soulève de sérieuses interrogations quant à la sécurité du personnel se rendant sur le site.

Toutefois, les instabilités signalées ci-dessus restent locales et limitées dans l'espace. Elles ne sont pas de nature à s'étendre au-delà de quelques mètres dans le toit et ne peuvent conduire à un effondrement de la surface du sol. Certes, les décollements constatés au toit des blocs ne s'arrêtent pas aux seuls bancs visibles et se propagent bien dans le toit. Ce fait a été mis en évidence par l'endoscopie du toit réalisée récemment par StocaMine. Toutefois, la distance affectée par ces décollements dépend des dimensions des galeries et peut difficilement s'étendre jusqu'au niveau exploité situé 23 à 25 m au-dessus du stockage (soit 8 fois la hauteur des galeries).

De même, les résultats de la modélisation thermo-mécanique destinée à l'étude de l'endommagement du toit, induit par l'incendie du bloc 15, indiquent que seulement dans l'hypothèse irréaliste et très sévère d'une température de 300 °C sur toute la paroi du bloc 15, l'endommagement provoqué par l'incendie peut s'étendre jusqu'au niveau de l'exploitation sus-jacente. Même dans cette hypothèse, l'endommagement s'atténue dans le toit ; il est important à proximité du stockage mais reste négligeable au mur de l'exploitation.

Pour cerner l'impact de l'endommagement du sel sur la perméabilité de ce matériau, celle-ci a été estimée par l'INERIS, à l'aide d'une relation empirique entre la porosité et la perméabilité du sel, proposée par les allemands (Rothfuchs, 2004) à partir des expériences de laboratoire et in situ. Les résultats sont présentés dans le Tableau 1.

Bien que purement indicatifs, sujets à de fortes incertitudes et non vérifiés à StocaMine, ces résultats suggèrent que la perméabilité de la zone endommagée en paroi des galeries et au toit du stockage peut être supérieure de plusieurs ordres de grandeur à la perméabilité du sel intact. Cela est conforme aux mesures in situ réalisées en Allemagne et aux Etats Unis (Stormont, 1991) et incite à mesurer in situ cette perméabilité, dans le cadre des mesures de maîtrise des risques liées à la sûreté à long terme du stockage.

	Sel intact	Zone endommagée par le creusement des galeries	Zone endommagée par l'incendie
Porosité de fissures (%)	< 0,1	0,4 - 0,8	2 - 5
Perméabilité (m²)	10 ⁻²¹ - 10 ⁻²⁰	< 10 ⁻¹⁸	10 ⁻¹⁷ - 10 ⁻¹⁵
Perméabilité (m/s)	10 ⁻¹⁴ - 10 ⁻¹³	< 10 ⁻¹¹	10 ⁻¹⁰ - 10 ⁻⁸

Tableau 1: Estimation théorique de la perméabilité de la zone endommagée autour du stockage (à partir de résultats de Rothfuchs et al, 2004).

Bien que les résultats des modélisations réalisées ne mettent pas en évidence une extension importante de l'endommagement mettant en communication le stockage et le niveau exploité, **l'INERIS a préconisé les dispositions suivantes :**

- 1- vérifier l'extension du décollement du toit du stockage au moyen d'une endoscopie jusqu'à la proximité du niveau exploité tout en laissant une distance de garde métrique permettant de ne pas mettre en communication le stockage et le niveau exploité par le sondage d'endoscopie ;
- 2- d'empêcher la progression du décollement du toit des blocs instables 16 à 26 qui ne contiennent pas de déchets et peuvent donc donner lieu, à terme, à une descente importante du toit sur toute la hauteur du bloc (2,8 m).

Ces dispositions ainsi que d'autres mesures de maîtrise de risques préconisées par l'INERIS seront mises en œuvre, une fois que l'option du stockage définitif aura été décidée. Ces travaux seront engagés tout en veillant au respect des dispositions de sécurité imposées par le décollement du toit des blocs 15 à 26.

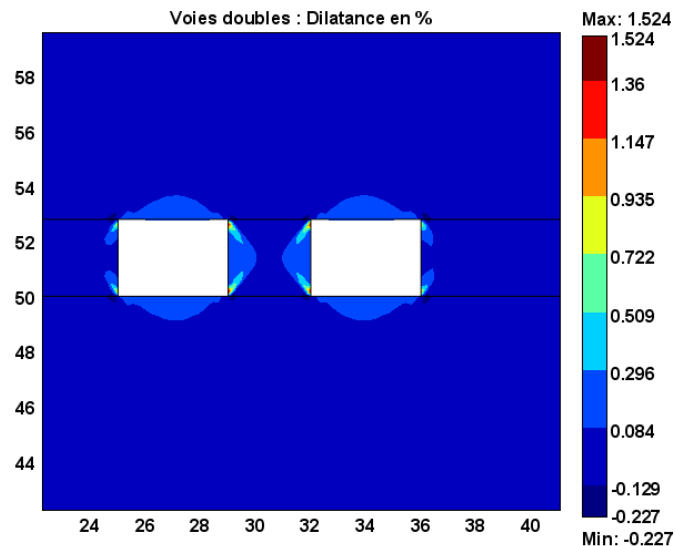
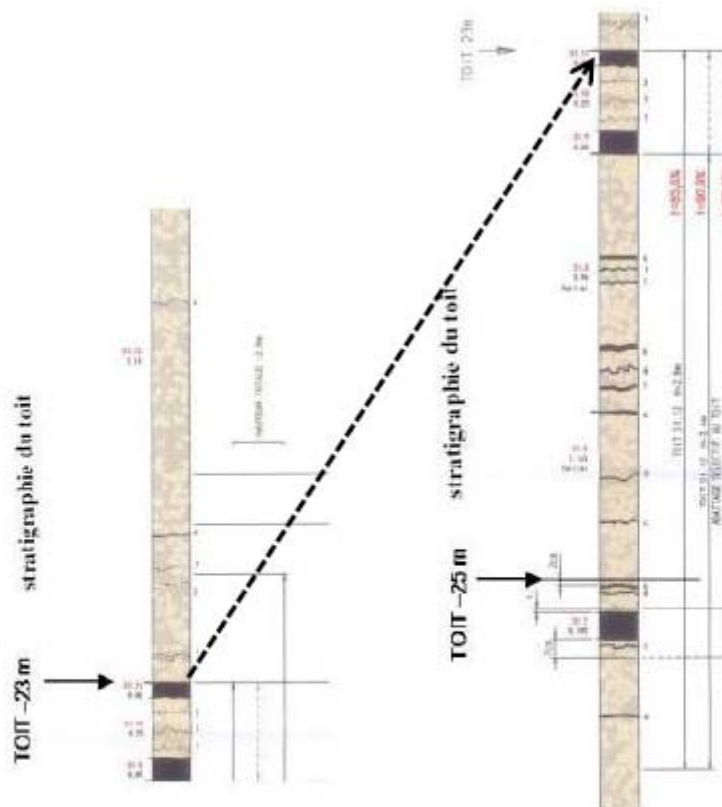


Figure 18 : Endommagement des piliers des voies double observé in situ et sur modèle



Figure 19: Décollement du toit et soufflage du mur rencontrés dans le stockage de StocaMine



Toit à -23 m
(sel plutôt massif)

Toit à -25 m
(sel très lité)

Figure 20: litage marqué du toit des blocs situés à -25 m du niveau de foudroyage

4.7 STABILITÉ DU STOT DE SÉPARATION ENTRE LES MINES AMÉLIE ET MARIE-LOUISE

La mine Amélie située au sud du secteur Ouest des MDPAs (partie moins profonde) a été séparée de la mine Marie-Louise en laissant un stot (sel et potasse) d'une quarantaine de mètres de largeur. L'étude hydrogéologique réalisée par l'INERIS [55], comme les études antérieures, se base sur deux hypothèses : existence d'un stot étanche et absence d'une étanchéité du fait du percement ou de la fissuration du stot. Le rapport de l'INERIS sur l'ennoyage [55] met en évidence que la largeur du stot varie considérablement d'un point à l'autre et atteint localement des valeurs très faibles, de 4 m au minimum.

L'INERIS s'est interrogé sur la stabilité et l'étanchéité du stot dans la mesure où, de part et d'autre de celui-ci, se trouvent des longues tailles foudroyées provoquant d'importantes concentrations de contraintes sur le stot. Cette question a fait l'objet d'une modélisation numérique [53].

Les résultats obtenus (Figure 21) indiquent que si la largeur du stot est inférieure à 20 m, celui-ci se trouve en état de ruine (fracturation intense traversant toute la largeur). Des largeurs de quelques mètres, même très locales, portent à considérer que la stabilité et l'étanchéité du stot de séparation entre les mines Amélie et Marie-Louise ne sont pas assurées. Il existe donc bien une possibilité de communication hydraulique entre ces deux mines qui rend le secteur Ouest accessible par l'ensemble des puits de ces mines.

Ce résultat paraît d'autant plus plausible que le retour d'expérience des mines de sel met en évidence une possibilité de communication au travers de stots bien plus larges. Un exemple actuel est l'ancienne mine de sel d'Asse en Allemagne où un stot de 300 m sépare l'exploitation par chambres et piliers et le flanc du dôme de sel, plus ou moins en contact avec l'eau souterraine. En dépit de cette épaisseur importante, la saumure s'est mise à s'introduire dans la mine, plusieurs dizaines d'années après l'arrêt de l'exploitation. Cette introduction n'a pas pu être arrêtée et continue d'être pompée actuellement.

Le résultat fourni par le modèle paraît donc tout à fait plausible et renforce le sentiment initial exprimé par l'INERIS quant à l'absence d'une étanchéité hydraulique au moins partielle, pour le stot de séparation.

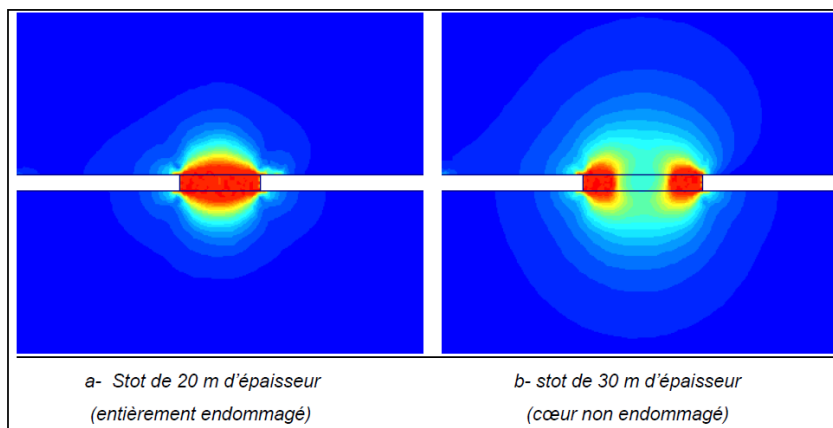


Figure 21: Extension de la zone endommagée dans le stot (zone en rouge).

4.8 IMPACT DES SONDAGES

Parmi tous les sondages réalisés dans le passé en particulier pour la reconnaissance géologique de la concession des MDPAs, 45 ont été recoupés par les travaux d'exploitation ([42] Mémoire 2, p. 35) ; 5 ont donné lieu – au moment de leur intersection – à des coulées de boue. Ce phénomène s'est arrêté ensuite sans conduire à une communication hydraulique entre la nappe aquifère et l'exploitation. Il s'agissait de sondages anciens, antérieurs à 1913 sauf pour le sondage DP1 datant de 1927. La coulée la plus importante a atteint environ 20 m³ : elle concerne le sondage Cernay II, foré en 1906 et recoupé en 1984 par les travaux de la mine Amélie. Compte tenu de son diamètre (probablement 8"1/2 soit 216 mm) et de sa profondeur (587 m), son volume intérieur peut être estimé à environ 21 m³ : cela signifie qu'il se serait vidé en totalité et que son comblement était donc resté à l'état liquide.

En effet, le mode de comblement des forages antérieurs à 1913 était le suivant ([42], Mémoire 2, p. 33) :

- le foreur fabriquait des boules d'argile séchée d'environ 10 cm de diamètre qu'il lançait dans le sondage rempli de boue (salée) ;
- lorsque la hauteur de boules atteignait 2 m en fond de sondage, celles-ci étaient compactées à l'aide d'un pilon métallique de 350 kg et 180 mm de diamètre tombant une dizaine de fois depuis une hauteur de 2 à 3 m ;
- puis l'opération recommençait, probablement jusqu'à atteindre la surface.

Le rapport de MICA [28] signale que 113 sondages ont été réalisés (avant 1913) et rebouchés par cette méthode dont 33 ont été recoupés par les travaux miniers du secteur Ouest : « dans la majorité des cas, les manifestations lors de la rencontre furent limitées à quelques suintements et à de faibles venues d'eau saturée en sel » ainsi que, pour 5 d'entre eux, à des coulées de boues. Cependant, « les sondages qui ont amené de l'eau lors des travaux d'exploitation ont été immédiatement traités depuis le fond » (MICA, 2004, p. 81). Concernant ces derniers, il s'agit :

- du sondage DP1 (n°90) datant de 1927 ;
- du sondage Cernay II (n°24) datant de 1906 (évoqué plus haut) ;
- de 3 autres sondages antérieurs à 1913 mais dont la dénomination - et donc la localisation exacte - sont inconnues.

Les deux sondages DP1 et Cernay II ont provoqué une venue de boue qui s'est « vite tarie » ([28], p. 44) : ils ont ensuite « été immédiatement injectés de ciment et n'ont plus été le siège d'écoulement d'eau, même après le foudroyage du toit de la couche exploitée ».

Parmi tous les sondages recensés par MDPAs, un seul se trouve à l'intérieur des blocs de StocaMine, d'après ses coordonnées. Il s'agit du sondage VIII ou Wittelsheim III qui porte la référence BSS n°0413-5X-0023/WITL3 ([42] Mémoire 2, p. 44). Cet ouvrage a été foré en 1905 dans la commune de Wittelsheim aux coordonnées Lambert X = 967050 m, Y = 320 704 m et Z = 265 m. Il a atteint la profondeur de 554 m, soit -289 m NGF, et a traversé les deux couches de potasse. Selon le Département DPSM du BRGM, ce sondage - situé entre les puits Else et Amélie 2 - aurait été rencontré après guerre lors des travaux d'exploitation de la mine Amélie et traité probablement par injection de béton et/ou par remblayage.

Selon les MDPa, la partie terminale de ce sondage se trouverait dans l'un des piliers du bloc 25 ; ce bloc étant situé à la cote d'environ -255 m NGF, la base du sondage WIII se trouverait à environ 34 m sous le plancher du site de stockage.

Rappelons que le dernier bloc utilisé pour le stockage de déchets est le bloc 15 et le bloc 25 ne contient donc pas de déchets. De plus, le sondage WIII n'a pas été rencontré pendant le creusement des galeries et des chambres. L'hypothèse d'un emplacement de ce sondage dans un pilier du bloc 25 semble donc plausible, d'après ses coordonnées. Il est même probable que ce sondage ait été laissé volontairement dans un pilier lors du creusement du stockage. Pour vérifier l'état de convergence de ce sondage, l'INERIS a réalisé une étude basée sur la modélisation de son comportement dans le temps [67]. Plusieurs hypothèses ont été étudiées :

- le sondage WIII se trouve encore rempli de boue (état fluide) ; cette hypothèse est renforcée par des informations récentes (non disponibles dans le mémoire n° 2 des MDPa sur les sondages) indiquant que WIII a été bien traversé par deux niveaux d'exploitation et qu'il a donné lieu, dans les deux cas, à des coulées de boues limitées ;
- le matériau de remplissage du sondage s'est solidifié progressivement et se trouve certainement à l'état solide, dans environ 3 siècles où l'ennoyage atteindra le niveau du stockage.

L'évolution dans le temps de la convergence du sondage WIII a été étudiée dans ces deux cas. Les principaux résultats de cette modélisation sont les suivants :

- dans l'hypothèse d'une prise en masse de la boue (consolidation), la perméabilité du matériau de remplissage serait très faible (compte tenu de la gamme de perméabilités des argiles) et le débit de saumure pouvant s'y infiltrer serait négligeable devant le débit expulsé à travers les barrières par la compaction résiduelle du stockage après l'ennoyage, même si le stockage est isolé par des barrières à très faible perméabilité. Ce fait tient à la très faible section du sondage, comparée à la section totale des 21 galeries d'accès au stockage (voies doubles ou triples). En effet, la section de ces voies d'accès est 8000 fois plus importante que celle du sondage WIII ;
- dans l'hypothèse d'un matériau de remplissage à l'état liquide, le diamètre du sondage diminue progressivement par fluage. Cette évolution n'est pratiquement pas ralentie par la présence de la boue, du fait de sa faible pression : sa hauteur serait d'une vingtaine de mètres au niveau du stockage, pendant toute la période précédant l'ennoyage et la boue aurait été mise à la pression atmosphérique pendant l'exploitation avec une pression de 0,5 MPa, au maximum (25 m de boue avec une densité de 2, au plus). Le temps nécessaire à une fermeture totale du sondage est estimé à 6 siècles, à compter de son creusement (en 1905). Cette durée dépasse celle estimée par l'INERIS pour l'ennoyage des MDPa (3 siècles) et revient à considérer qu'en

débit d'un fluage important, le sondage rempli de boue ne serait pas entièrement fermé après l'envoyage du stockage.

Ces résultats ont conduit l'INERIS à considérer qu'en présence d'un matériau de remplissage non consolidé (état liquide), le sondage WIII constituerait une voie de transport potentiel de la saumure contaminée entre le stockage et le niveau exploité. Ce scénario tient à la possibilité d'expulsion de la saumure sous l'effet du fluage des parements du stockage. En retenant une vitesse de compaction des vides envoyés de 0,01% par an, le volume de la saumure contaminée susceptible d'être expulsé par le sondage est estimé à 0,7 m³/an au maximum (0,01% de 7000 m³ correspondant au volume des vides résiduel des déchets) Le temps nécessaire à une communication hydraulique entre le stockage et le niveau exploité situé à une vingtaine de mètres de ce dernier serait alors de l'ordre d'un an (le volume du sondage étant inférieur à 0,8 m³ [volume initial du sondage] ce qui reste comparable au volume expulsé par le fluage). L'expulsion de la saumure est d'ailleurs d'autant plus rapide que le diamètre résiduel du sondage, réduit par le fluage, est faible. En revanche, le débit de la saumure expulsée à travers le sondage est indépendant du diamètre résiduel du sondage ; il est imposé par le fluage du stockage, si le sondage constitue la seule voie de communication hydraulique vers l'extérieur du stockage.

Ces éléments ont conduit l'INERIS à préconiser la mise en œuvre des dispositions suivantes, préalablement à tout stockage illimité :

- 1- entreprendre les investigations nécessaires à une localisation précise du sondage WIII ;**
- 2- vérifier ensuite autant que possible si le sondage est rempli d'un matériau solide ou liquide ;**
- 3- procéder à son scellement, si le sondage est encore rempli de boue ;**
- 4- si la reconnaissance ou le traitement du sondage ne peuvent pas être réalisés pour des raisons techniques ou liées à la sécurité, mettre en place une barrière étanche autour du pilier concerné.**

Ces dispositions ont été retenues par StocaMine et leurs études d'ingénierie sont en cours.

Nota

L'INERIS a également étudié l'impact des trous de dégazage réalisés au toit des MDPA (dégazage du grisou présent dans les insolubles en particulier dans le banc de marnes du toit). Cette étude a conclu que la fermeture complète des ces sondages par fluage du sel n'interviendra que dans 5 à 6 siècles. Ils ne seront donc pas entièrement fermés lors que le niveau d'envoyage atteindra le toit du stockage (sans préjuger de la performance des barrières et d'autres moyens de maîtrise des risques). Toutefois, comme les trous de dégazage débouchent dans le niveau marneux du toit, une distance de garde suffisante existe entre le fond de trous et le niveau d'exploitation sus-jacente. Ce niveau imperméable ne permet pas de communication hydraulique entre le stockage et l'exploitation et la résistance hydraulique du toit demeure supérieure à celles des barrières envisagées. Le risque de transport éventuel de contaminants est donc étudié préférentiellement à travers les barrières.

5. CONCLUSION

L'étude de sûreté géotechnique qui vient d'être présentée s'appuie sur plusieurs travaux :

- les études géomécaniques réalisées en particulier par l'INERIS et les travaux menés auparavant par d'autres organismes, notamment l'Ecole des Mines de Paris ;
- les travaux de recherche réalisés en France et à l'étranger sur le sel, en particulier, les résultats des expériences de laboratoire et in situ obtenus sur le sel de la mine Amélie aux MDPAs, dans le cadre de programmes européens. Ces travaux de recherche avaient débouché sur le développement des modèles rhéologiques de sel des MDPAs, caractérisés en laboratoire et in situ. Ces modèles ont servi aux études réalisées par l'INERIS.

Les principales conclusions de ces études peuvent être résumées ainsi :

- 1- En ce qui concerne **la stabilité mécanique** des différents ouvrages, les points suivants sont à souligner :
 - les approches basées sur la modélisation et les observations s'accordent sur le fait que les piliers des voies desservant le stockage sont endommagés, ce qui soulève le problème de la tenue mécanique à moyen terme et de l'accessibilité dans le temps au stockage ;
 - le contact entre le toit du stockage et les déchets est inévitable, à court ou à moyen terme (dans quelques années à quelques dizaines d'années, selon le bloc considéré). Ce fait, qui tient à la fois au fluage du sel et au décollement des bancs, est de nature à compliquer considérablement, voire à rendre impossible un déstockage différé des déchets ;
 - les résultats de la modélisation du stot de séparation entre les mines Amélie et Marie-Louise indiquent que la stabilité du stot est compromise localement, notamment dans les parties où son épaisseur est inférieure à 20 m. Cela signifie que l'étanchéité hydraulique du stot n'est pas assurée et que l'ensemble du secteur Ouest sera en communication lors de l'envoyage.
 - le toit immédiat, le mur et les piliers de la zone affectée par l'incendie sont endommagés. Toutefois, la modélisation a indiqué que la fissuration des bancs n'a pas atteint le niveau du foudroyage, situé 25 m plus haut et que la perméabilité du sel doit y être restée très faible.

2- S'agissant **du fluage des ouvrages souterrains**, il convient de noter que :

- le modèle rhéologique de Norton, largement reconnu et employé à travers le monde, a été utilisé par l'INERIS après un calage des paramètres, effectué sur les convergences mesurées dans les différents blocs. Le modèle reproduit bien les déplacements mesurés jusqu'à présent, pendant environ 10 ans ; il a été extrapolé à moyen et long termes ;
- la vitesse de convergence « toit-mur » est de 0,9% par an aussi bien pour les voies doubles situées à 550 m de profondeur que pour le site de stockage ;
- la vitesse de convergence est fortement influencée par la profondeur, sous l'effet conjugué de l'état de contrainte et de la température résultant du gradient géothermique. De ce fait, les galeries sont fermées en quelques années à 1000 m de profondeur alors que leur fermeture demande deux siècles à 500 m de profondeur. La porosité et la perméabilité peuvent cependant y demeurer suffisantes, après leur fermeture mécanique, pour autoriser un passage de la saumure pendant et après l'ennoyage ;
- les mesures d'affaissement réalisées par les MDPA montrent que la vitesse d'affaissement résiduel des terrains foudroyés est pratiquement constante et voisine de 1 cm/an, une dizaine d'années après l'exploitation. On en déduit une vitesse de compaction des terrains foudroyés de l'ordre de 0,1% avant l'ennoyage.
- Les phénomènes de fluage et de compaction résiduelle des terrains foudroyés demeurent importants, même à long terme (sur plusieurs siècles). Ils ont été pris en compte dans les études d'ennoyage et de transport de la saumure et de polluants.

3- Concernant **l'impact réciproque de l'ennoyage sur le fluage**, il convient de préciser :

- la durée de l'ennoyage dépend du volume des vides accessibles à l'eau laissés par des anciennes exploitations de potasse. Ce volume comprend celui des terrains de foudroyage mais aussi la porosité cumulée provenant des pores et des fissures des terrains. L'INERIS estime que l'hypothèse de 5 à 10% de vides résiduels, retenue dans les études antérieures menées par d'autres organismes, qui s'appuie sur une amplitude d'affaissement de 90% d'ouverture des tailles, est probablement justifiée à grande profondeur (1000 m) mais surestimée à l'échelle de l'ensemble de l'exploitation. Ainsi l'INERIS a retenu, en moyenne, un volume des vides résiduels de 20% du volume exploité. Cela conduit à considérer que l'ennoyage n'interviendra donc qu'à long terme, au bout de quelques siècles : les ouvrages d'infrastructure seront alors fermés. Là encore, cette fermeture mécanique ne signifie pas pour autant que les anciens chantiers d'exploitation (tailles et ouvrages d'accompagnement ou d'infrastructure) seront étanches, d'un point de vue hydraulique. Leur perméabilité restera sans doute significative même en présence de faibles vides résiduels ;

- la pression hydrostatique d'ennoyage, liée à la saumure et à l'eau douce, fera diminuer considérablement l'état de contrainte régnant dans les ouvrages. Cet effet de « confinement » conduira à une diminution de la vitesse de fluage, de plus d'un ordre de grandeur. A la fin d'ennoyage, cette vitesse sera voisine de 0,01% par an, dans les terrains foudroyés, soit inférieure à 1 mm/an. C'est une vitesse très faible, non perceptible et non mesurable aujourd'hui (inférieure au bruit de fond). Elle sera sans impact sur la stabilité de la surface du sol et sur la sécurité des personnes et des biens.

4- En ce qui concerne **la présence de sondages dans le périmètre du stockage**, notons que :

- les trous d'aérage réalisés en petit diamètre ne communiquent pas avec l'exploitation sus-jacente et ne constitueraient donc pas de voie de transport potentiel de la saumure contaminée si le stockage était ennoyé ;
- le seul sondage traversant l'exploitation et le niveau du stockage est le sondage W3 réalisé en 1905. Il se trouve dans un pilier du bloc 25 qui ne contient pas de déchets. Des travaux de localisation et de traitement seront cependant réalisés afin d'écartier toute possibilité de communication avec les déchets, dans l'hypothèse où la boue argileuse ayant servi de matériau de remplissage de ce sondage ne serait pas encore consolidée.

Avant de clore cette partie, deux autres points sont à signaler :

- 1- même si la compaction résiduelle est très lente à long terme, le fluage constituera le principal moteur de transport de fluides vers l'extérieur. Ce phénomène a donc été pris en compte dans les études hydrogéologiques et de transport réalisées pour StocaMine;**
- 2- les instabilités du toit (décollements), du mur (soufflage) et des piliers de certaines galeries doubles sont de nature à s'accroître dans le temps, d'où la nécessité d'engager dans les meilleurs délais les travaux prévus sur le site de stockage de StocaMine (liés aux mesures de maîtrise de risques).**

6. RÉFÉRENCES

- Cosenza, P. (1996). Sur les couplages entre comportement mécanique et processus de transfert de masse dans le sel gemme. Thèse de l'Université Paris 6
- Ghoreychi, M. (1991). Comportement du sel broyé sous l'effet d'une source de chaleur dans des sondages réalisés dans une mine de sel. Edition CCE, EUR 13638FR
- Ghoreychi, M. (2006). Coupled Processes involved in post-mining, Keynote Lecture, Proceedings Eurock 9-12 mai, Liège, Elsevier.
- Kazan, Y. N. (1994). Comportement Thermo-Elasto-Viscoplastique des ouvrages souterrains dans le sel gemme. Thèse de l'ENSMP.
- Langer, M. (1981). The rheological behavior of rock salt. Proc. First Conf. Mech. Behavior of Salt, Trans Tech Publications, Germany, 201-240.
- Pouya, A. (1991). Comportement rhéologique du sel gemme. Application à l'étude des excavations souterraines. Thèse de l'ENPC.
- Rothfuchs, T. Bollingerfehr, W., Bechthod, W. (2004). Lessons learnt from large-scale experiments in Asse mine / Germany, Proceedings Euradwaste, 6-7.
- Stormont, J.C., Howard, C.L., Daemen, J.J.K. (1991). In situ measurements of rock salt permeability changes due to nearby excavation, Sandia Report SAND90-3134 - UC-721.
- Schulze, O., Pop, T., Kern, H. (2001). Development of Damage and permeability of deforming rock salt, Engineering Geology, 61, 163-180, Elsevier.
- Thorel, L. (1994). Plasticité et endommagement des roches ductiles – Application au sel gemme. Thèse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.

Rapports de StocaMine

- CESAME, 2006. Synthèse sur l'ennoyage de la mine de potasse Secteur Ouest, septembre.
- CESAME, 2008. L'ennoyage des mines de potasse. Dossier commun aux secteurs Est et Ouest. Rapport AB/1143/04/08, avril, 80 p.
- Combes P., Ledoux E. (1996). Etude de sûreté d'un projet de stockage de déchets toxiques dans la mine Amélie – Approche des problèmes liés à l'hydrogéologie, Rapport du Centre d'Informatique Géologique de l'Ecole des Mines de Paris, LHM/RD/90/60.
- Feuga, B. (2010). Comparaison entre les conditions d'isolement des déchets dans le centre de stockage de StocaMine et dans quelques sites allemands de stockage en mine de sel ou de potasse.
- Gombert, P. 2010, Synthèse critique des études hydrogéologiques sur l'ennoyage du site, Rapport d'étude INERIS-DRS-10-108130-03801A du 30 mars.
- Gombert, P., 2010. Stockage souterrain de STOCAMINE (68) - Etude hydrogéologique de l'ennoyage du site, Rapport d'étude N° DRS-10-108130-12810A, 23 décembre.

Hadj-Hassen, F., Tijani, M. (2006). Actualisation de l'étude de stabilité du stockage de déchets toxiques dans la mine d'Amélie. Ecole des Mines de Paris.

Hadj-Hassen, F. (2009). STOCAMINE : Evaluation du volume des vides souterrains résiduels après ennoyage, Mines-ParisTech.

Laouafa, F. 2010. Analyse critique des études géomécaniques du stockage de StocaMine, Rapport d'étude INERIS-DRS-10-108130-04240A, 2 avril.

Mica Environnement (2004). Etude géologique, hydrogéologique et géotechnique du centre de stockage de StocaMine.

Schultz, P., Thill, G. (2002). Incendie de stockage souterrain Société StocaMine, Rapport d'Expertise pour le Tribunal de Grande Instance de Mulhouse.

MDPA, Mémoire 5 (2008). Les affaissements miniers et la stabilisation des terrains, p. 556-631.

Vouille, G. (1990). Etude de sûreté d'un projet de stockage de déchets toxiques dans la Mine Amélie. Aspects mécaniques du problème. Ecole des Mines de Paris.