

**Note de synthèse des travaux d'expertise
de l'INERIS relatifs au devenir du stockage
de déchets de StocaMine au sein de la
mine Amélie**

12/12/2013

INERIS-DRS-13-143465-13181A

Résumé

Spécialiste de la gestion intégrée des risques, l'INERIS a été sollicité fin 2009 par StocaMine, filiale des Mines de Potasse d'Alsace (MDPA), pour étudier le devenir du stockage de déchets industriels implanté dans la mine Amélie au sein du Bassin Potassique (Haut-Rhin). Le site est accessible par deux puits encore en service sur la commune de Wittelsheim. L'Institut a mobilisé ses compétences pluridisciplinaires sur les risques liés au stockage souterrain et mouvements de terrain ; sur le risque chimique (caractérisation, toxicité) et en évaluation de risques sanitaires liés aux substances chimiques ; en analyse de risques accidentels.

Les équipes d'experts de l'INERIS interviennent dans le cadre d'une mission ayant pour objectif de fournir une aide à la décision dans le choix du scénario de fermeture du stockage. Cette mission a comporté :

- L'analyse critique des études réalisées et des données produites par l'exploitant et les organismes intervenants sur le stockage de déchets, en complétant éventuellement les informations existantes par des études additionnelles réalisées par l'INERIS et d'autres organismes compétents.
- L'étude comparative des scénarios de fermeture potentiels les plus probables. Une première étude a été réalisée sur la base des deux hypothèses extrêmes : déstockage total ou stockage total illimité. Une étude complémentaire a été conduite, dans un second temps, sur plusieurs scénarios de déstockage faisant varier la quantité de déchets déstockés.
- A partir du choix de l'exploitant (stockage illimité), l'évaluation plus détaillée des risques liés au scénario envisagé et l'élaboration de recommandations pour assurer la mise en œuvre de ce scénario dans le cadre du dossier administratif de fermeture.

La présence de déchets à long terme, dans le sous-sol, pose la question du transfert possible des polluants contenus dans ces déchets vers la biosphère, principalement par des eaux souterraines. Ce transfert est susceptible de porter atteinte à la santé de populations qui pourraient être exposées à ces contaminants (via l'eau, l'air, des végétaux et des terres pollués en surface...). Le dossier de fermeture du site à la charge de l'exploitant doit, au titre de la réglementation, proposer la solution qui aura le moins d'impact à court et long termes (plusieurs centaines, voire milliers d'années). Il doit s'assurer, en cas de maintien du stockage, que ce transfert de pollution ne dépasse pas des niveaux pour lesquels la santé humaine et la biodiversité seraient affectées ; dans le cas contraire, des solutions alternatives au stockage doivent être mises en œuvre.

Les analyses de l'INERIS

Les analyses de l'INERIS se fondent sur plusieurs faits scientifiques :

- les terrains géologiques sus-jacents à des exploitations salifères souterraines (c'est donc le cas des stockages de déchets dans ces anciennes mines) sont réputés étanches (ne communiquant pas avec la nappe aquifère). Toutefois, à plus ou moins long terme, les vides miniers qui en résultent, et ce, quel que soit le site considéré, sont envahis par l'eau (ennoyage) par les puits qui constituent des points faibles.
- Les vides miniers sont amenés à se refermer avec le temps par un phénomène propre au sel appelé « fluage ». Cette fermeture entraîne la remontée vers la surface de la saumure

accumulée dans le réservoir minier si l'ennoyage s'achève avant la fermeture totale des vides.

Sur ces fondements, l'Institut a réalisé des études géomécanique, hydrogéologique et géochimique spécifiques au site de StocaMine. Il a constaté des points de faiblesse dans la stabilité mécanique du site susceptibles de compliquer voire rendre progressivement impossible tout retrait éventuel des déchets. Il précise par ailleurs que l'ennoyage, qui devrait durer 300 ans environ, contribuera à long terme à un contact entre la saumure et les déchets, ce qui conduira à une libération de polluants dans la saumure. De plus, même si le fluage deviendra très lent à long terme, il constitue le principal moteur de migration de saumure vers l'extérieur. La combinaison de l'ennoyage et du fluage des vides miniers aura pour conséquence une remontée de saumure vers la surface (saumure des vides miniers et saumure potentiellement contaminée par les déchets), et donc un écoulement dans la nappe alluviale d'Alsace. Si aucune mesure de maîtrise des risques n'est mise en œuvre, la saumure polluée remplira l'ensemble des vides miniers situés au-dessus du site de stockage, dont le volume est estimé à 7 millions de m³ environ. Par ailleurs, la masse totale de déchets contenus dans le stockage est de 44 000 tonnes. La solubilité des polluants dans la saumure sera influencée par l'équilibre géochimique du milieu. La libération de certains polluants (plomb, nickel, baryum, arsenic, cadmium...) sera limitée mais ce n'est pas le cas d'autres substances (mercure et chrome), dont les concentrations à la source resteront relativement élevées quelles que soient les conditions.

Les études comparatives des scénarios de fermeture

Sur la base de cette analyse, l'INERIS a effectué une première étude comparative sur deux scénarios extrêmes, déstockage ou stockage illimité sur le site de StocaMine, avec plusieurs variantes. Cette étude a principalement porté sur l'évaluation de l'impact sanitaire et environnemental de l'élément variable entre les deux scénarios : les phases de déstockage-transport-restockage des déchets dans un autre site (site de surface à Drambon, et sites capables d'accueillir des déchets ultimes dits « de classe 0 » : stockages souterrains d'Heilbronn ou d'Herfa-Neurode en Allemagne). Compte tenu des données disponibles, le restockage à long terme des déchets dans les deux sites allemands n'a pu faire l'objet d'une comparaison exhaustive, terme à terme, avec un stockage illimité sur le site de StocaMine.

En effet, ces études comparatives visent à hiérarchiser des scénarios et ne constituent pas une évaluation détaillée des risques de chacun d'entre eux : elles ont une vocation structurante d'aide à la décision pour aboutir au choix d'une solution, dont il convient de faire l'étude approfondie dans un deuxième temps. Sa méthodologie répond à un enjeu de cohérence : permettre le traitement de données hétérogènes en quantité et en qualité et le croisement d'informations de natures différentes. La démarche s'inspire de méthodes d'évaluation reconnues et validées (norme ISO 14040/44 et Analyse du Cycle de Vie – ACV) et se fonde sur le calcul d'indicateurs globaux, intégrateurs du risque sur une durée infinie. L'impact sur la santé est évalué en DALY (Disabled-Adjusted-Life-Year), somme des années de vie en bonne santé perdues, du fait d'un décès prématuré ou d'un état de santé détérioré. L'impact sur l'environnement est calculé en PDF.m².an (Potentially Disappeared Fraction), part d'espèces animales ou végétales potentiellement affectées ou disparues sur une surface de territoire de 1 m² pendant 1 an. L'impact environnemental étant globalement le même quel que soit le scénario considéré, il est apparu que l'impact sanitaire était l'élément déterminant dans la comparaison des scénarios.

A l'issue de la première étude comparative, le scénario ayant le moins d'impact est celui du maintien illimité du stockage sur le site de StocaMine avec la mise en place associée de

barrières. Cela tient en particulier au fait que ce scénario évite les risques liés à des opérations de déstockage-transport-restockage.

Par ailleurs, l'Institut a eu recours à une modélisation numérique qui vise, en particulier, à évaluer le rejet de contaminants dans la nappe d'Alsace dans l'optique de vérifier la pertinence des solutions envisagées et éventuellement de les améliorer. La modélisation des rejets de polluants dans la nappe a ainsi permis d'améliorer la stratégie des mesures de maîtrise des risques de la solution de stockage illimité avec barrières.

StocaMine a par la suite demandé à l'Institut de conduire des études complémentaires portant sur cinq scénarios de déstockage partiel et de restockage sur le site allemand de Sondershausen : déstockage des seuls déchets mercuriels et arséniés de deux blocs du stockage de StocaMine ; retrait des seuls déchets mercuriels et arséniés de quatre blocs du stockage de StocaMine ; retrait de tous les déchets des deux blocs du premier scénario ; déstockage de tous les déchets des quatre blocs du second scénario ; retrait de tous les déchets du site (hors bloc 15 touché par l'incendie). La méthodologie de comparaison appliquée à cette seconde étude est identique à celle de la première étude. Cette étude complémentaire montre que l'impact sanitaire à long terme, sur le site de StocaMine et sur le site de Sondershausen, reste à peu près le même quels que soient ces scénarios. Les phases de manipulation (déstockage et restockage) et transport des déchets représentant une part importante de l'impact, c'est le scénario qui déplace le moins de déchets qui aura le moins d'impact.

Un second exercice de modélisation géochimique montre que les scénarios de déstockage étudiés réduisent les concentrations de mercure dans la saumure du stockage, mais avec pour conséquence, dans certains cas, l'augmentation des concentrations d'autres polluants. Cependant, la modélisation du panache de dispersion des contaminants dans la nappe d'Alsace confirme que les cinq scénarios de déstockage partiel ne conduisent à aucun dépassement des critères de qualité réglementaires, avec une marge de sécurité importante.

A l'issue de l'ensemble des études, dans l'hypothèse du maintien du stockage sur le site de StocaMine comme dans l'hypothèse d'un déstockage partiel des déchets, l'INERIS recommande de mettre en œuvre une stratégie de réduction des risques, avec la mise en place de barrières autour du stockage.

Préconisations de l'INERIS

L'Institut préconise la mise en place de mesures de maîtrise des risques (MMR) sur le site de StocaMine, fondées sur l'installation de « bouchons » ou barrières ouvragées constituées d'argiles gonflantes, très peu perméables, en périphérie immédiate du stockage pour isoler les déchets.

La présence des barrières a pour vocation de retarder l'arrivée et la sortie de la saumure au travers des déchets sur au moins 1 000 ans, temps pendant lequel le fluage sera ralenti et aura réduit les vides susceptibles d'accueillir la saumure dans le stockage et en dehors. Dans ce cas de figure, la quantité de saumure polluée contenue dans le stockage et susceptible de se répandre dans les vides miniers sus-jacents au stockage est au plus de 7 000 m³ (et non plus 7 millions de m³). A très long terme, lorsqu'il n'y a plus de fluage, il subsiste un phénomène de transport très lent de la saumure polluée par diffusion mais dont l'impact peut être considéré comme négligeable.

Par ailleurs, en complément de ces barrières, il convient d'étudier le maintien d'un « court-circuit hydraulique », par l'aménagement d'une voie d'écoulement privilégiée pour la saumure au sein de galeries parallèles au stockage.

La mise en place de ces mesures de maîtrise des risques doit s'accompagner d'autres actions indispensables : la vérification de l'état de stabilité du toit et des parois du stockage ; la suppression de la zone endommagée autour des galeries du stockage, à l'endroit où seront positionnées les barrières ; un suivi du phénomène d'envoyage (celui-ci a débuté dans les années 1950) ; une attention particulière à la fermeture des deux derniers puits en activité ; le remblayage des chambres de stockage vides ; la surveillance de la qualité de l'eau en aval des puits concernés associée à des mesures compensatoires spécifiques en cas de dépassement du critère de qualité de l'eau dans la nappe d'Alsace ; la mise en œuvre de restrictions relatives à l'usage du sol ou au pompage dans cette nappe.

Par ailleurs, selon les préconisations de l'INERIS, des investigations complémentaires ont été effectuées par StocaMine concernant un ancien sondage de reconnaissance supposé être situé dans un pilier au sein du stockage ainsi que les trous de dégazage existant au toit des chambres dans la zone de stockage, ceci afin de vérifier l'absence de voie de communication hydraulique. Les conclusions de ces investigations devront être prises en compte dans l'évaluation de l'impact du stockage sur la pollution potentielle de la nappe d'Alsace.

Introduction

Spécialiste de la gestion intégrée des risques, l'INERIS a été sollicité fin 2009 par StocaMine, filiale des Mines de Potasse d'Alsace (MDPA), pour étudier le devenir du stockage de déchets industriels implanté dans la mine Amélie au sein du Bassin Potassique (Haut-Rhin) et accessible par deux puits encore en service sur la commune de Wittelsheim.

Les équipes d'experts de l'INERIS interviennent dans le cadre d'une mission ayant pour objectif de fournir une aide à la décision dans le choix du scénario de fermeture du stockage¹. Cette mission se décompose en trois volets :

- L'analyse critique des études réalisées et des données produites par l'exploitant et les organismes intervenants sur le stockage de déchets, en complétant éventuellement les informations existantes par des études additionnelles réalisées par l'INERIS et d'autres organismes compétents.
- L'étude comparative des scénarios de fermeture potentiels les plus probables. Une première étude a été réalisée sur la base des deux hypothèses extrêmes : déstockage total ou stockage total illimité. Une étude complémentaire a été conduite, dans un second temps, sur plusieurs scénarios de déstockage faisant varier la quantité de déchets déstockés.
- A partir du choix de l'exploitant (stockage illimité), l'évaluation plus détaillée des risques liés au scénario envisagé et l'élaboration de recommandations pour assurer la mise en œuvre de ce scénario dans le cadre du dossier administratif de fermeture² déjà déposé.

L'Institut a ainsi mis à disposition de StocaMine ses compétences pluridisciplinaires sur les risques liés aux stockages souterrains et aux mouvements de terrain, sur le risque chimique (caractérisation, toxicité), sur l'évaluation des risques sanitaires liés aux substances chimiques et sur l'analyse des risques accidentels.

L'enjeu du dossier de fermeture du site

La présence de déchets à long terme dans le sous-sol pose la question de la possibilité de transfert des polluants contenus dans ces déchets en dehors du stockage, principalement par le biais des eaux souterraines et d'émissions gazeuses. Ce transfert est en effet susceptible, s'il atteint des niveaux importants, de porter atteinte à la santé de populations qui pourraient être exposées à ces polluants (via l'eau, l'air, des végétaux et des terres pollués en surface...). Le transfert de polluants peut également avoir un impact négatif sur l'environnement (espèces animales, végétales).

¹ L'article L515-7 du Code de l'Environnement indique que « le stockage souterrain en couches géologiques profondes de produits dangereux, de quelque nature qu'ils soient, est soumis à autorisation administrative. Cette autorisation ne peut être accordée ou prolongée que pour une durée limitée et peut en conséquence prévoir les conditions de réversibilité du stockage. Les produits doivent être retirés à l'expiration de l'autorisation ». L'article, amendé le 3 février 2004, prévoit qu'« à l'issue d'une période de fonctionnement autorisé de vingt-cinq ans au moins, ou si l'apport de déchets a cessé depuis au moins un an, l'autorisation peut être prolongée pour une durée illimitée, sur la base d'un bilan écologique comprenant une étude d'impact et l'exposé des solutions alternatives au maintien du stockage et de leurs conséquences ».

² Le décret n° 2006-283 du 10 mars 2006 précise les modalités d'application d'une demande de prolongation pour une durée illimitée de l'autorisation de stockage souterrain de produits dangereux. Toutefois, le contenu du dossier de fermeture n'est pas défini au-delà d'une « étude de sûreté du confinement à long terme de la matrice réceptrice compte tenu de ses caractéristiques géotechniques ». La notion de « sûreté » renvoie au contexte réglementaire des Installations Nucléaires de Base (INB) et des produits explosifs. L'INERIS a fondé ses travaux sur ces approches réglementaires, ainsi que sur les approches méthodologiques d'études de danger propres à la réglementation des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE).

L'exploitant doit produire un dossier de fermeture du site qui propose la solution ayant le moins d'impact sur la santé humaine et sur les populations sur le court et le long termes (plusieurs centaines, voire milliers d'années). Il doit donc s'assurer, en cas de maintien du stockage, que ce transfert de pollution ne dépasse pas des niveaux pour lesquels la santé humaine et l'environnement seraient affectés ; dans le cas contraire, des solutions alternatives au stockage doivent être mises en œuvre.

Les caractéristiques du stockage

L'exploitation des mines de potasse d'Alsace s'est déroulée de 1910 à 2002 sur deux secteurs, est et ouest, sans aucune communication entre eux. Deux couches de potasse d'âge tertiaire ont été exploitées, essentiellement par la méthode des « longues tailles foudroyées »³. L'exploitation a été réalisée à des profondeurs variant entre 450 m et 1 100 m. Dans le secteur ouest, un volume total de 200 millions de m³ a été extrait par 15 puits. La mine Amélie, qui accueille le stockage de déchets, est située dans la partie sud du secteur ouest. Elle comporte cinq puits dont trois sont remblayés (Amélie I, Amélie II, Max) et deux sont encore en service (Joseph et Else).

Le stockage de déchets industriels a été réalisé dans des galeries situées à 550 m de profondeur et creusées spécifiquement dans une couche de sel gemme située à une vingtaine de mètres sous la couche inférieure de potasse exploitée. Le sommet de la formation salifère se trouve à 300 m de profondeur. Le gisement de potasse et de sel gemme est recouvert par des formations géologiques imperméables de type marnes, anhydrite et gypse. Ces formations sont elles-mêmes surmontées, au droit du stockage, d'environ 35 m de terrains quaternaires, au sein desquels se trouve la nappe d'Alsace (environ 30 m d'épaisseur).

Le stockage a été ouvert en février 1999. La zone a été excavée par la méthode des chambres et piliers pour le besoin spécifique du stockage, formant des blocs⁴, dans lesquels sont placés les déchets, conditionnés en colis (fûts ou « big-bags »). Les principales voies⁵ d'accès sont les puits Joseph et Else, qui assurent les entrées et sorties d'air, la descente des colis et la circulation des équipes. Les activités de stockage ont été arrêtées à la suite d'un incendie survenu en septembre 2002 dans le bloc 15, bloc en cours de remplissage avec, en particulier, des déchets amiantés.

Les dimensions du stockage sont de 700 m x 500 m. Les piliers sont de section carrée de 20 m de côté. Les chambres ont une largeur de 5,5 m et une hauteur de 2,8 m. Le site de stockage est composé de 12 blocs dont seulement 9 (les blocs 11 à 15 et 21 à 24) ont servi à stocker effectivement des déchets. Les blocs 16, 25 et 26 sont restés vides (les 16 et 26 n'étant d'ailleurs que partiellement creusés). D'un volume prévu initialement de 300 000 m³, les déchets n'en occupent actuellement que 22 000 m³. Les déchets stockés comprennent des déchets arséniés, mercuriels, chromiques, amiantés, de laboratoire, de galvanisation, des résidus d'incinération de déchets, des sels de trempe cyanurés, des produits phytosanitaires et des terres polluées.

³ La taille signifie le chantier d'extraction du minerai ; le foudroyage est un éboulement provoqué volontairement à l'arrière d'un front de taille, ou dans un chantier dont l'exploitation est achevée. Il permet de stabiliser les terrains en comblant les vides. Les terrains exploités sont alors dits « foudroyés » :

⁴ Les « blocs » sont formés par le creusement de galeries parallèles recoupées à angle droit par des galeries plus courtes, créant ainsi des piliers entre les espaces vides. Ces piliers constituent le seul soutènement du stockage.

⁵ La voie de communication désigne tout ouvrage de communication souterraine quel qu'il soit (galerie, puits...).

I. Analyse des données

L'INERIS a procédé, dans un premier temps, à l'analyse de la documentation existante relative au stockage de déchets, afin de collecter les éléments pertinents à partir : des données établies par l'exploitant lui-même ; des données produites par les bureaux d'études et experts missionnés par StocaMine ; des données issues de la littérature scientifique et technique. L'analyse de l'ensemble de cette documentation a permis à l'INERIS d'identifier les données manquantes et de proposer des études complémentaires pour les obtenir. Ces études ont été conduites par l'INERIS et d'autres organismes dans des domaines de compétences complémentaires.

Hypothèses de départ concernant le site de StocaMine

L'INERIS fonde ses analyses sur le fait que les vides miniers issus d'une exploitation saline⁶ sont à plus ou moins long terme (plusieurs siècles) envahis par l'eau une fois l'exploitation achevée (les actions de pompage étant stoppées). La prise en compte de ce phénomène dit « d'ennoyage » a son importance dans la mesure où les eaux d'ennoyage représentent un vecteur potentiel de transfert des polluants contenus dans les déchets du stockage. L'Institut partage également l'hypothèse retenue par les études antérieures effectuées sur le site que l'ennoyage des MDPa a débuté dès l'arrêt du pompage qui a précédé le remblaiement des premiers puits en 1956.

Par ailleurs, les études de l'INERIS partent d'un fait scientifique unanimement admis : les roches évaporitiques (comme le sel et la potasse) se comportent comme des fluides visqueux et, à terme, tout ouvrage creusé dans ce type de formation est amené à se refermer par un phénomène appelé « fluage »⁷. Cette fermeture progressive des vides a pour conséquence la sortie de l'eau ou de l'air contenu dans les vides miniers ; dans le cas présent, le fluage conduit les eaux d'ennoyage vers la surface et, ce faisant, vers la nappe d'Alsace située au-dessus de l'exploitation. L'effet du fluage décroît dans le temps, au fur et à mesure que les terrains foudroyés se compactent (effet d'opposition), pour s'annuler lorsque tout l'espace vide est refermé.

Enfin, la technique de foudroyage a provoqué en Alsace jusqu'à 6 m d'affaissement de la surface du sol. Malgré cet affaissement, aucune communication hydraulique avec la nappe d'Alsace n'a été observée en dehors des puits : l'étanchéité des terrains recouvrant l'exploitation est assurée par un ensemble de couches géologiques marneuses imperméables. Les principales voies de communication hydraulique entre les aquifères et le stockage sont les puits d'accès, dont l'étanchéité totale ne peut être garantie à long terme.

1. Les études de l'INERIS complétant l'analyse des données

1.1 Une étude géomécanique du stockage

Cette étude a pour but d'évaluer la stabilité des ouvrages souterrains hébergeant le stockage, afin d'obtenir des données sur l'accessibilité au site à moyen terme (dans quelques dizaines d'années) et *in fine* de répondre à la question : sera-t-il possible ou non

⁶ Sel gemme ou potasse.

⁷ Le fluage est la déformation lente et retardée d'un corps soumis à une contrainte constante, provoquée par la durée d'application de cette contrainte. Dans le contexte d'un gisement salifère, il désigne le phénomène par lequel la pression exercée par les terrains situés au-dessus du gisement conduit à la fermeture progressive des vides qui se trouvent au cœur des couches géologiques de sel.

d'accéder au stockage dans un futur proche (notamment dans une optique de déstockage) ? Le deuxième champ d'analyse vise à préciser la vitesse de fluage des différents vides miniers (stockage proprement dit, galeries de mine, terrains foudroyés), pour déterminer l'influence de ce phénomène de réduction des vides sur les conditions d'accès au site et sur le transfert des polluants vers l'extérieur. Le troisième volet doit estimer le degré d'endommagement du toit⁸ du stockage provoqué par l'incendie du bloc 15, pour éclairer la question : une communication hydraulique entre le stockage et les terrains sus-jacents (susceptible de constituer une voie de transfert potentielle pour les polluants) peut-elle se créer au travers du sel endommagé ?

1.2 Une étude hydrogéologique du site

L'étude hydrogéologique porte sur le phénomène d'envoyage du site de stockage, l'eau étant une voie de transfert potentielle des polluants. A long terme, les vides miniers vont se remplir d'eau compte tenu de la configuration géologique environnante, qui est source de venues d'eau. Bien que la zone où se trouve le stockage soit située dans une formation géologique exempte d'eau, les formations situées au-dessus en renferment, de même que certaines des failles qui les traversent. Il existe en outre un fort doute sur l'intégrité du stot⁹ qui sépare la mine Amélie du reste du secteur ouest de l'exploitation. Enfin, les 15 puits du secteur ouest et les 200 sondages réalisés pour la reconnaissance, même fermés, sont des vecteurs potentiels de communication hydraulique entre le stockage et les terrains situés au-dessus.

Au contact du sel ou de la potasse, cette eau se transformera progressivement en saumure¹⁰ saturée. La durée de ce phénomène d'envoyage inévitable (de l'ordre de quelques siècles) est fonction du volume de vides miniers résiduels et du débit d'envoyage. Dans le contexte du stockage, une hypothèse mérite examen : la remontée en surface de saumure potentiellement polluée à la suite d'un contact avec les déchets. En effet, compte tenu de la fermeture progressive des vides miniers, comment la saumure sera-t-elle conduite vers la surface ?

1.3 Une étude géochimique des polluants

L'étude s'intéresse au « terme source » de la pollution potentiellement issue des déchets stockés. L'examen de ce terme source, préalable à l'évaluation de l'impact toxique et écotoxique des substances, implique la caractérisation de la nature des polluants. Mais elle traite aussi de la quantité et du comportement (cinétique de rejet) de chaque type de polluants dans un milieu comme l'air ou l'eau. L'étude géochimique vise d'abord à établir la quantité de polluants présents dans le stockage. Etant donné la méthode d'analyse semi-quantitative employée lors de la réception des déchets, la part estimée de chacune des différentes substances est, en effet, sujette à une incertitude, de l'ordre de 50 %. Cette incertitude est prise en compte dans l'ensemble des études qui ont été menées dans le cadre de la mission de l'Institut. Les calculs antérieurs se sont quasi-exclusivement fondés sur les informations recueillies dans la documentation administrative (Certificat d'Acceptation Préalable). Dans un second temps, l'étude aborde la question des concentrations de polluants qui pourraient être éventuellement rejetées dans les eaux d'envoyage et dans l'air

⁸ Le toit désigne deux éléments distincts : d'une part, les terrains situés au-dessus d'un gisement, d'une formation ou d'une couche géologique et d'autre part le plafond d'une infrastructure souterraine : chambre, galerie, etc. (également appelés « ciel »).

⁹ Le stot est un volume de minerai laissé en place pour protéger une voie ou une installation du fond ou de la surface. Le stot est situé entre les mines Amélie et Marie-Louise, dans le secteur ouest de l'exploitation du bassin potassique d'Alsace.

¹⁰ Eau à forte concentration en sel.

souterrain, fluides qui seront tous deux progressivement repoussés vers l'extérieur par l'ennoyage et la fermeture des vides miniers. En effet, en fonction de l'équilibre chimique dans le milieu, le mécanisme de libération des éléments dans l'eau peut s'avérer très différent d'un polluant à l'autre. L'étude de la cinétique de rejet fournit des informations permettant d'étudier *in fine* les concentrations de polluants dans la saumure, susceptibles d'être transférés en dehors de la zone de stockage et d'avoir un impact sur les eaux souterraines.

2. Les principales conclusions

2.1 L'étude géomécanique

L'INERIS constate des points de faiblesse dans la stabilité mécanique et une forte interaction entre le fluage et l'ennoyage, qui contribuent à la présence de fluides dans lesquels les polluants pourraient se libérer. De plus, même si le fluage deviendra très lent à long terme, il constituera toujours un moteur de migration de fluides (saumure des vides miniers et saumure polluée dans la partie stockage) vers l'extérieur.

L'examen du **phénomène de fluage** a permis d'observer que la vitesse de convergence entre le toit et le mur d'un ouvrage souterrain est fortement influencée par la profondeur (du fait d'une pression des terrains plus forte exercée sur l'ensemble de la structure et d'une température naturelle plus élevée). Les galeries situées à 500 m de profondeur se fermeront en deux siècles environ contre quelques années pour celles situées à 1 000 m et plus. La vitesse de convergence des parois provoquera une réduction du volume de vides laissés au-dessus des déchets de l'ordre de 1 % par an pour le stockage. Compte tenu du volume occupé par les déchets dans les chambres, cela conduira à un contact entre le toit des chambres et les colis de déchets en quelques années à quelques dizaines d'années selon les blocs concernés. Après le contact « toit-déchets », la vitesse de fluage ralentira au sein du stockage car les déchets, une fois compactés, exerceront une « contre-pression » sur le toit, le mur et les parements¹¹. De même, la vitesse de fluage des terrains foudroyés est réduite à environ 0,1 % par an avant l'ennoyage. L'ensemble des vides résiduels devrait être refermé au bout de 10 000 ans. Plus largement, l'Institut a noté que le fluage, même si son effet décroît avec le temps, conservera un impact non négligeable à long terme (plusieurs siècles) : la vitesse de fluage ne s'annulera qu'au bout de plusieurs milliers d'années, lorsque la pression développée par la compaction des terrains foudroyés sera égale à la pression naturelle exercée par les terrains situés au-dessus. Ce phénomène a donc été pris en compte dans l'étude des transferts de pollution.

L'ennoyage du secteur ouest au droit du stockage et de l'exploitation sus-jacente devrait intervenir à long terme : le volume de vides résiduels, laissés par l'exploitation de la potasse, est considérablement réduit du fait de la technique de foudroyage : il est estimé aujourd'hui, en moyenne, à 20 %¹² du total des vides créés par l'exploitation (entre 10 % à 1 000 m de profondeur et 30 % à 500 m). Au moment de l'ennoyage, le fluage aura alors refermé une grande partie des vides (galeries, tailles...). Mais le processus de fermeture mécanique n'étant pas équivalent à un « encapsulage », il n'apporte pas d'étanchéité hydraulique. Même avec de faibles vides résiduels, la perméabilité de l'ensemble des zones exploitées pourra rester significative. Par ailleurs, l'ennoyage, par un effet de « contre-pression » de la saumure, fera

¹¹ Le mur désigne deux éléments distincts : d'une part, la surface inférieure d'une formation géologique et, d'autre part, le sol d'une infrastructure souterraine comme une galerie ou une chambre ; les parements sont les parois d'une infrastructure souterraine (galerie, chambre...).

¹² Ce qui correspond à environ 40 millions de m³ ; à la fin de l'ennoyage, dans plusieurs siècles, on estime que ce volume aura été réduit à environ 29 millions m³ par la compaction due au fluage.

considérablement diminuer le fluage dans tout le secteur ouest : la vitesse de fermeture sera alors réduite à environ 0,01 % par an dans les terrains foudroyés à la fin de l'ennoyage. En revanche, après l'ennoyage, la vitesse d'affaissement des terrains sera très faible, de 1 mm/an tout au plus : cela n'aura pas d'effet sur la vulnérabilité des bâtiments et des infrastructures en surface (d'autant plus que l'affaissement résiduel sera homogène). Par ailleurs, le contexte géologique (présence de terrains imperméables recouvrant l'exploitation) n'est pas favorable à un soulèvement sensible des terrains en surface, conséquence parfois observée de l'ennoyage de vides miniers.

Sur la **stabilité mécanique**, les experts de l'INERIS concluent que les piliers des voies desservant le stockage sont endommagés. Le contexte géologique à certains niveaux (disposition en couches fines) favorise en effet, pour des infrastructures souterraines, les phénomènes de décollement des bancs¹³ du toit. Les dégradations visibles sont susceptibles de s'intensifier dans la période précédant la fermeture des ouvrages par fluage. De manière générale, le décollement important du toit dans certains blocs du stockage et le fluage du sel rendront de plus en plus difficile le retrait des déchets ; l'état de ruine de certains piliers des voies doubles, qui ont été renforcées par cerclage et boulonnage, soulève de sérieuses interrogations quant à la sécurité du personnel intervenant sur le site. Par ailleurs, la conjonction du fluage et des phénomènes de décollement des bancs et de soufflage du mur¹⁴ des galeries rendra impossible un déstockage différé dans le temps : le contact entre le toit des galeries et les déchets interviendra à court terme (dans les 10 à 30 prochaines années selon les endroits). A plus long terme, la stabilité du stot entre la mine Amélie et le secteur ouest de l'exploitation n'étant pas démontrée, il n'y aura pas d'étanchéité hydraulique au cours de l'ennoyage. Le stot peut en effet être sujet à des fracturations intenses sur toute sa largeur, même lorsque celle-ci atteint 20 m (en certains endroits, elle n'est d'ailleurs que de quelques mètres¹⁵). Enfin, le toit, le mur et les piliers de la zone où a eu lieu l'incendie sont endommagés et ne garantissent pas non plus l'étanchéité hydraulique. Toutefois, la fissuration des bancs n'affecte pas, pour le moment, l'imperméabilité de la partie supérieure du toit du stockage, en dessous du niveau exploité.

2.2 L'étude hydrogéologique

L'hypothèse de référence privilégiée par l'INERIS repose sur un débit d'ennoyage de l'ordre de 100 000 m³/an pour tout le secteur ouest de l'exploitation, ce qui conduit à une durée d'ennoyage d'environ 300 ans. Le phénomène d'ennoyage couplé à la fermeture progressive des vides miniers implique un écoulement de saumure vers la surface, dont une part sera potentiellement polluée par les déchets. Si le site de stockage reste en l'état, la saumure polluée remplira l'ensemble des vides miniers situés au-dessus du site de stockage¹⁶, soit environ 7 millions de m³. Ce volume de saumure sera très lentement transféré vers la nappe alluviale d'Alsace à un rythme estimé à environ 700 m³/an à la fin de l'ennoyage.

Compte tenu des données analysées, l'hypothèse d'ennoyage retenue par les experts de l'Institut se fonde sur une absence d'étanchéité entre la mine Amélie et le reste du secteur ouest et une communication hydraulique au travers du stot endommagé. Parmi les autres caractéristiques prises en compte, un taux de compaction actuel des terrains foudroyés de 80 % sert de référence, ce qui correspond à une porosité résiduelle (vides résiduels) des terrains de 20 % en moyenne. L'hypothèse distingue la vitesse de convergence du fluage

¹³ Phénomène de séparation des couches géologiques de faible épaisseur du reste du toit, source potentielle de chutes de blocs.

¹⁴ Remontée de la partie inférieure d'une formation géologique ou du plancher d'une galerie.

¹⁵ Le retour d'expérience, notamment de la mine de sel allemande d'Asse (Basse Saxe) démontre l'absence d'étanchéité de stots bien plus larges (300 m).

¹⁶ Compte tenu du sens de circulation de la saumure, seul ce volume est susceptible d'être pollué, le reste des vides miniers résiduels (près de 23 millions de m³) étant situé en aval hydraulique du stockage.

des galeries (1 % par an pour les voies doubles à 550 m de profondeur avant ennoyage et 0,1 % après ennoyage) de celle des terrains foudroyés des tailles (0,1 % par an avant ennoyage et 0,01 % après ennoyage). Pour estimer le débit d'ennoyage, une hypothèse raisonnablement majorante est faite : la circulation de saumure au sein des matériaux de remblai des puits ou le long du contact entre le revêtement des puits et les terrains naturels (extrados) est inéluctable à long terme : le débit correspondant a été considéré de manière conservatoire étant donné que les matériaux de remblai ainsi que l'extrados des puits ne feront que se dégrader dans le temps. Par conséquent, on a donc considéré un débit total de remontée de la saumure par les 15 puits du secteur ouest dans la nappe alluviale d'Alsace de 3 000 m³/an, valeur proche de celle constatée immédiatement après le fonçage des puits, supérieure au débit d'exhaure¹⁷ actuel. La part du débit de saumure transitant par les vides situés au-dessus du stockage, et donc potentiellement polluée, est de 700 m³/an.

L'Institut, à l'appui de cette hypothèse d'ennoyage, a ensuite étudié les diverses possibilités de remontée de saumure vers la nappe d'Alsace. Quatre situations ont été jugées peu probables :

- Le cas d'une remontée en surface de la masse de sel (stockage y compris) due à la formation d'un dôme de sel (diapir¹⁸) n'est, en l'état actuel des connaissances, pas envisageable dans une formation géologique comme celle du Bassin Potassique d'Alsace. Ce constat s'est appuyé sur l'avis d'expert de Bruno Vendeville, professeur à l'Université de Lille I.
- Dans une première analyse, les sondages de reconnaissance, à l'examen de la documentation existante (travaux de colmatage effectués par l'exploitant) et étant donné la vitesse de fluage des terrains salifères, ne sont pas considérés comme un vecteur de remontée de saumure potentiellement polluée vers la surface. Néanmoins, ce constat n'est valable que s'il a été vérifié que les sondages sont bien colmatés par des matériaux à faible perméabilité.
- L'écoulement spontané de saumure en surface par les puits remblayés résultant d'une différence de densité entre la saumure et l'eau douce et d'un écart topographique de la base de la nappe d'Alsace au droit des différents puits, s'il intervient, sera négligeable par rapport à l'écoulement induit par le fluage. Ce phénomène ne pourra d'ailleurs se mettre en place que plusieurs centaines d'années après la fin de l'ennoyage. Ce type d'écoulement n'a de rôle sur le transfert de polluants que si l'on considère l'écoulement sur le secteur ouest dans son ensemble, et pas uniquement dans la mine Amélie. Dans ce cas, l'entrée d'eau douce issue de la nappe alluviale d'Alsace par les puits situés en amont topographique a pour effet une sortie de saumure potentiellement polluée par les puits en aval, avec un débit cumulé de l'ordre de 140 m³/an. Cette conclusion s'appuie sur l'avis d'expert de Marc Bonnet, ancien directeur du département eau du BRGM.
- Aucune circulation d'eau n'a été mentionnée dans la documentation relative aux failles à leur traversée de la couche de sel hébergeant le stockage : les failles existantes sont réputées imperméables et ne sont donc pas considérées comme des vecteurs potentiels de remontée de saumure en surface. Même en cas de séisme d'une magnitude 5 ou 6 (correspondant au séisme régional de référence), l'hypothèse d'une remontée de saumure due à la réactivation d'une faille sismique semble peu probable. Si l'écoulement par une faille avait exceptionnellement lieu, le débit ne serait pas sensiblement différent de celui de l'hypothèse étudiée précédemment et il se produirait alors dans la même zone

¹⁷ Le fonçage est l'action de creuser un puits ; l'exhaure signifie l'action d'évacuer les eaux d'infiltration d'une mine ou d'une carrière, en général par pompage.

¹⁸ Un diapir est le résultat de la remontée de roches légères (formations salines notamment) au travers de roches encaissantes plus denses.

géographique. Cette conclusion s'est appuyée sur l'avis d'expert de François-Henri Cornet, professeur à l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg.

L'hypothèse de la remontée en surface de saumure considérée comme la plus significative par les experts de l'INERIS reste, par conséquent, due au phénomène de fluage en cours et qui se poursuivra après le remblayage des puits. La compaction des vides miniers résiduels couplée au phénomène d'ennoyage occasionnera une remontée de saumure par les puits. Le stockage de déchets fait alors office de « filtre contaminant » dans ce processus. La saumure remonte en effet progressivement des vides résiduels les plus profonds jusqu'au site de stockage (sur une durée d'environ 240 ans). Cette saumure envahit le site de stockage et se charge en polluants issus des déchets ; une fois le stockage ennoyé, la saumure polluée continue sa remontée pour envahir les quartiers exploités au-dessus. Une fois ces vides sus-jacents ennoyés, la saumure polluée remonte par les puits jusqu'à la nappe alluviale d'Alsace dans laquelle elle se mélange. C'est par les 5 puits de la mine Amélie (les plus hauts du secteur ouest et les plus proches du stockage) que s'effectuera la remontée de saumure polluée. La mise en place de mesures de maîtrise des risques peut contribuer à ralentir la remontée, par les puits, de la saumure polluée vers la nappe d'Alsace.

2.3 L'étude géochimique

L'INERIS a évalué la quantité de polluants susceptible d'être transférée vers les eaux souterraines, à partir d'une masse de déchets totale, contenue dans le stockage, d'environ 44 000 tonnes. Le contact entre la saumure et les déchets, du fait de l'ennoyage, interviendra sur une longue durée. Dans ce contexte, la solubilité des polluants dans la saumure sera influencée par l'équilibre géochimique du milieu : la libération de certains polluants (plomb, nickel, baryum, arsenic, cadmium...) sera limitée (en fonction du volume de saumure) mais ce ne sera pas le cas d'autres polluants (essentiellement mercure, chrome et antimoine), dont les concentrations à la source resteront élevées quelles que soient les conditions d'ennoyage. L'air souterrain ne présente pas de traces d'activité biologique et on observe une légère activité chimique due au dégazage des déchets, sans formation d'émissions toxiques.

L'Institut a recalculé en deux temps les quantités de polluants stockés. Il a d'abord établi une première approche de la quantité de polluants à partir de deux séries de données : les masses des déchets stockés connues par les Certificats d'Acceptation Préalable (CAP) et la teneur moyenne en polluants (déterminée à partir des analyses de contrôle pratiquées à l'arrivage des lots). Une fois récupérées les données complémentaires sur les masses de déchets par lot, les quantités de polluants ont ensuite pu être précisées en croisant les masses avec les concentrations de chaque lot. Ce calcul a fait apparaître que les teneurs en polluants dans les déchets sont très variables pour un même type de déchet. Par ailleurs, on a observé que les polluants sont répartis de manière très hétérogène au sein du stockage.

Afin d'évaluer les concentrations dans la saumure des polluants susceptibles d'être libérés et transférés jusqu'à la nappe d'Alsace, l'Institut a étudié leur comportement dans le milieu sur le long terme. La solubilité¹⁹ dans la saumure d'une substance dépend de sa nature et de ses propriétés, mais elle est aussi fonction de l'équilibre géochimique du milieu, qui dépend de multiples facteurs (composition des eaux entrantes, température, pH, saturation en sel...). L'estimation du pH du stockage après la mise en contact des déchets avec la saumure

¹⁹ Capacité d'une substance à se dissoudre dans une autre (un liquide, désigné sous le terme « solvant ») et par extension la concentration maximale qui peut se dissoudre, à température donnée.

indique un milieu alcalin (basique). Pour les éléments traces métalliques (ETM), à l'équilibre chimique²⁰, deux catégories de polluants se distinguent :

- Les polluants dont le potentiel de dissolution est limité par des minéraux qui sont insolubles au niveau de pH du stockage (hydroxydes). En d'autres termes, ces polluants, en se combinant à ces minéraux insolubles, précipiteront dès que leur produit de solubilité sera atteint. La quantité de polluants libérés est donc dépendante du volume de saumure et non de la quantité de polluants présents au sein des déchets (concentrations de l'ordre du µg/L au sein du stockage).
- Les polluants dont le potentiel de dissolution n'est pas limité par saturation, du fait de leur complexation²¹ par les chlorures et les cyanures. Dans les conditions du stockage, la quantité de polluants libérés n'est pas fonction du volume de saumure : elle est proportionnelle à la quantité de polluants présents au sein des déchets (concentrations de l'ordre du mg/L au g/L au sein du stockage). Sous cette forme complexée, ces polluants ne précipitent pas car la masse de polluants présents dans les déchets n'est pas suffisante pour que leur produit de solubilité soit atteint.

Dans la saumure polluée du stockage, l'impact du baryum, du bismuth, du cobalt, du plomb, du nickel et du cadmium sera limité en fonction du volume de saumure, alors que ce n'est pas le cas du mercure et du chrome dont les concentrations à la source seront élevées quelles que soient les conditions d'ennoyage. L'arsenic, polluant le plus présent en quantité dans les déchets, est une substance dont le comportement est intermédiaire : elle peut précipiter sous forme d'arséniate de calcium et de baryum, moins insoluble. Ses concentrations seront donc dépendantes du volume de saumure et non de la masse d'arsenic présent dans les déchets. Une incertitude demeure sur le comportement de l'antimoine²².

L'air des vides miniers qui sera chassé vers l'extérieur par l'ennoyage peut-il être pollué ? Les travaux de l'Institut sur les concentrations de polluants dans l'air montrent que les conditions ne sont pas réunies pour générer des émissions gazeuses d'arsine, de mercure, d'acide cyanhydrique ou de phénols. La complexation des métaux et le pH élevé du stockage pourraient même contribuer à réduire le potentiel d'émission de polluants gazeux (notamment d'acide cyanhydrique).

²⁰ En vertu des lois de la thermodynamique, à l'équilibre chimique, quand deux minéraux de solubilité différente sont en présence, le plus soluble va se dissoudre et le moins soluble rester sous forme précipitée. Un précipité résulte d'un équilibre entre la phase solide (sel) et la phase liquide (solution). A partir d'une quantité et d'une température données, une substance ne se dissout plus, car la solution est dite « saturée ». La substance « précipite » alors, c'est-à-dire qu'elle conserve une phase solide.

²¹ Phénomène dans lequel une structure chimique se forme par association de deux ou plusieurs entités chimiques indépendantes, ions ou molécules.

²² Dans les eaux, l'antimoine existe principalement sous deux degrés d'oxydation, Sb(V), forme la plus oxydée, très soluble et Sb(III), moins soluble. Cette dernière forme est considérée comme plus toxique, car susceptible d'interagir plus facilement avec les systèmes biologiques. Compte tenu des phénomènes de complexation, la première incertitude porte sur l'apparition possible ou non, dans le milieu alcalin qui baignera le stockage, d'une forme tétravalente Sb(IV). Or contrairement aux deux autres formes, le calcul de la concentration précise de cette espèce est impossible, en l'état actuel des connaissances scientifiques ; seul un ordre de grandeur est évaluable. La deuxième incertitude porte sur la toxicité à prendre en compte dans l'évaluation de l'impact sur la longue durée : les conditions chimiques de la nappe d'Alsace laissent envisager des conditions oxydantes favorables à l'apparition de la forme pentavalente Sb(V), la moins toxique, mais cette hypothèse n'est pas confirmée.

II. Etudes comparatives des scénarios

A partir des éléments d'information analysés et des données obtenues par des études additionnelles réalisées dans la phase d'analyse des données, l'INERIS a procédé à des études comparatives des scénarios les plus probables quant au devenir du stockage de déchets.

Dans une première étude réalisée en 2012, deux scénarios extrêmes ont été envisagés, déstockage²³ ou stockage illimité, avec plusieurs variantes. StocaMine a ensuite sollicité l'INERIS en 2013 pour l'examen, dans le cadre d'une seconde étude, de scénarios complémentaires de déstockage, en faisant varier les catégories et les types de déchets déstockés.

Il est important de noter que ces études comparatives ont principalement porté sur l'évaluation de l'impact sanitaire et environnemental de l'élément variable entre les scénarios de stockage et de déstockage (total ou partiel) : la phase de déstockage-transport-restockage des déchets.

En effet, ces études comparatives visent à hiérarchiser des scénarios et ne constituent pas une évaluation détaillée des risques de chacun d'entre eux : elles ont une vocation structurante d'aide à la décision pour aboutir au choix d'une solution, dont il convient de faire l'étude approfondie dans un deuxième temps. Compte tenu des données disponibles, le restockage à long terme des déchets dans d'autres contextes que celui de StocaMine n'a donc pas fait l'objet d'une comparaison exhaustive, terme à terme, avec le stockage illimité envisagé sur le site alsacien.

1. La méthodologie de comparaison

La méthodologie répond à l'enjeu principal de cohérence de la comparaison : permettre le traitement de données hétérogènes en quantité et en qualité ainsi que le croisement et l'« agrégation » d'informations de natures différentes. La démarche s'inspire de méthodes d'évaluation reconnues et validées (norme ISO 14040/44 et Analyse du Cycle de Vie – ACV) et se fonde sur le calcul d'indicateurs globaux de risque.

Les scénarios sont comparés sous l'angle des performances environnementales, en incluant l'évaluation, à court et long termes, des risques sanitaires pour les travailleurs et les populations avoisinantes, des risques d'accident, des impacts pour l'environnement et les écosystèmes. D'autres critères ne sont toutefois pas pris en compte : l'impact de chaque scénario étudié sur le changement climatique ; sur la qualité de l'air ambiant ; sur les ressources naturelles autres que sur les eaux souterraines ; les enjeux juridiques, financiers et sociopolitiques qui lui sont propres.

La mise en œuvre de la méthodologie a été confrontée à trois difficultés : le nécessaire recours à des hypothèses pour estimer l'exposition des personnes en cas d'accident ; l'insuffisance des données relatives aux sites de restockage de déchets identifiés dans les scénarios de déstockage ; l'incertitude sur la composition des déchets du bloc 15.

Par ailleurs, elle présente quelques limites : certaines données, principalement celles concernant le site de StocaMine, doivent être volontairement schématisées pour pouvoir comparer de manière homogène deux scénarios dont le degré de précision est différent. Il est également important de préciser que la comparaison prend en compte un nombre limité

²³ StocaMine avait sollicité des travaux de la part de plusieurs bureaux d'études entre 2004 et 2006 pour étudier la possibilité d'une réversibilité du stockage.

de substances chimiques, les dix substances identifiées au préalable comme substances d'intérêt au regard des impacts sanitaire et environnemental (mercure, chrome, antimoine, arsenic, cadmium, baryum, plomb, bismuth, cobalt, nickel).

La méthodologie utilisée a retenu deux types d'indicateurs globaux, l'un qui concerne l'impact sur la santé, l'autre l'impact sur l'environnement. Ces indicateurs sont cumulatifs et intègrent toutes les échelles de temps et d'espace :

- L'impact sur la santé est évalué en DALY (Disabled-Adjusted-Life-Year), « année de vie corrigée de l'incapacité ». Cet indicateur, adopté par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), représente la somme des années de vie en bonne santé perdues par l'ensemble des personnes exposées, que ce soit du fait d'un décès prématuré ou d'un état de santé détérioré (maladie, blessure, infirmité...). Il porte sur l'ensemble d'un vaste bassin de population, sur une période donnée (dans le cas de l'étude, un temps infini).
- L'impact sur la qualité des écosystèmes est évalué par un indicateur global qui traduit les dommages sur la biodiversité. Le PDF.m².an (Potentially Disappeared Fraction), fraction d'espèces disparues, représente la part d'espèces animales ou végétales potentiellement affectées ou disparues sur une surface de 1 m² pendant 1 an. Le produit « espèces affectées x surface x unité de temps » peut s'interpréter de plusieurs façons différentes, par exemple : 1 000 PDF.m².an peuvent représenter l'affection ou la disparition de 10 espèces sur 100 m² pendant 1 an, mais aussi celle d'une espèce sur 1 000 m² pendant 1 an ou sur 1 m² pendant 1 000 ans.

Pour chaque scénario, la comparaison a consisté d'abord à inventorier toutes les étapes²⁴ ; puis à identifier et quantifier les impacts ; et enfin, pour chacun des impacts, à évaluer sa part dans les indicateurs. Certains impacts peuvent concerner les deux types d'indicateurs (une substance est, par exemple, souvent à la fois toxique et écotoxique).

Le calcul de certains risques et impacts sanitaires et environnementaux s'est appuyé sur des données et sur des statistiques existantes (durée d'exposition des travailleurs ; accidentologie dans le domaine des travaux souterrains, risque chimique, risques liés au Transport de Matières Dangereuses –TMD–, etc.). En l'absence de données statistiques pour certaines parties des scénarios, des modélisations numériques ont été réalisées pour prédire les effets des substances sur la santé et l'environnement (impact diffus via l'air, l'eau, les sols par exemple). Le modèle IMPACT 2002+²⁵ utilisé combine trois catégories de données : la toxicité de substances, leur potentiel de transfert vers le milieu naturel et les modes d'exposition des populations.

2. Scénarios extrêmes (déstockage total / stockage illimité)

2.1 Présentation des scénarios de la première étude comparative

2.1.1 Les scénarios de déstockage

L'INERIS n'a pas été sollicité par StocaMine pour étudier la faisabilité des techniques de traitement des déchets. Les scénarios de déstockage postulent que les déchets stockés sont ultimes. Autrement dit, il est considéré qu'aucun traitement n'est possible dans des conditions techniques viables. S'ils sont déstockés, les déchets doivent être envoyés dans d'autres sites de stockage.

²⁴ Les aspects de gestion et surveillance du site de stockage sur le long terme n'ont pas été intégrés comme étape dans l'analyse de risques, car ils sont, si ce n'est identiques, comparables dans l'ensemble des scénarios.

²⁵ Le développement du modèle IMPACT 2002+ a été initié par l'Ecole Polytechnique de Lausanne (Suisse) et il est actuellement sous la responsabilité de l'Université du Michigan (Etats-Unis) : <http://www.sph.umich.edu/riskcenter/jolliet/impact2002+.htm>.

23 000 tonnes de déchets (déchets amiantés et résidus d'incinération) doivent être restockés dans des installations de stockage de déchets dangereux (dit « de classe 1 »). Il en existe 14 en France et les scénarios ont opté pour le site de Drambon (Côte d'Or), du fait de sa proximité géographique et des autorisations règlementaires dont il dispose pour recevoir les déchets de StocaMine.

19 000 tonnes de déchets (déchets mercuriels, arséniés, chromiques ; sels de trempe ; terres polluées ; déchets phytosanitaires...) doivent être stockés dans un stockage souterrain de déchets ultimes (dit « de classe 0 »), comme StocaMine. Les seuls centres disponibles sont situés en Allemagne. Les scénarios ont considéré deux sites de stockage : le site le plus proche de celui de StocaMine, à Heilbronn (Bade-Wurtemberg) et le site d'Herfa-Neurode (Hesse), plus éloigné mais dont les caractéristiques, les conditions de sécurité et de surveillance semblent présenter un plus grand intérêt. L'étude de ce site a été recommandée par le comité de pilotage mis en place par les pouvoirs publics²⁶. L'impact sanitaire et environnemental qui est évalué dans le cas du restockage à Heilbronn et à Herfa-Neurode est le seul impact des déchets provenant du site de StocaMine, en excluant l'impact des déchets déjà présents dans ces deux stockages souterrains (1 million de tonnes de déchets sont déjà stockées à Heilbronn ; Herfa-Neurode, dont la capacité maximale est de 6 millions de tonnes, a déjà accueilli 2,7 millions de tonnes de déchets).

Les 1 775 tonnes de déchets du bloc 15 sont considérés isolément car l'incendie en a modifié les caractéristiques (connues à leur arrivée), par perte de masse et apparition de substances connexes, dioxines et furannes notamment. Une étude réalisée par l'exploitant a pointé les difficultés de mise en sécurité du site et de déstockage de ce bloc, compte tenu de son état.

Les scénarios de déstockage sont au nombre de 6 :

- déstockage total/restockage à Drambon et à Heilbronn ;
- déstockage total/restockage à Heilbronn ;
- déstockage/restockage hors bloc 15²⁷ à Heilbronn ;
- déstockage total/restockage à Drambon et à Herfa-Neurode ;
- déstockage total/restockage à Herfa-Neurode ;
- déstockage/restockage hors bloc 15 à Herfa-Neurode.

Les scénarios prennent en compte les risques à toutes les étapes du déstockage et du restockage : les travaux préparatoires souterrains (sécurisation des accès, installation de systèmes de ventilation...) ; reprise et ré-emballage des colis de déchets ; transport jusqu'à une zone de stockage intermédiaire (puits Joseph) ; remontée des déchets ; stockage intermédiaire en surface ; transport ; stockage temporaire en surface sur le site de réception ; descente des déchets en sous-sol et restockage (avec opérations éventuelles de reconditionnement). C'est le transport routier entre les deux sites qui a été retenu comme hypothèse de travail. En effet, le choix s'est porté sur ce mode de transport relativement fluide, qui n'exige ni stockage tampon ni attente sur site et permet d'éviter plus facilement les zones urbanisées.

²⁶ La fermeture du stockage, sous la responsabilité de l'exploitant, fait, conformément au Code de l'Environnement, l'objet d'un processus de concertation. Le dossier administratif de fermeture est instruit par les services de l'Etat (préfecture et services déconcentrés), décisionnaire par arrêté préfectoral, après consultation du public et avis des instances (CODERST, CLIS...), personnes et organismes associés. Dans le cadre de ce processus, un comité de pilotage a été créé. Ce comité d'experts indépendants est chargé d'étudier les éléments du dossier présentés par StocaMine, sur la base des travaux techniques de l'INERIS, et de faire le lien avec la Commission Locale d'Information et de Surveillance (CLIS).

²⁷ Dans les deux cas de déstockage hors bloc 15, le bloc 15 est laissé sur place dans le site de StocaMine, avec la mise en place de mesures spécifiques de maîtrise des risques.

2.1.2 Les scénarios de stockage illimité

Les scénarios de stockage illimité considèrent deux variantes :

- stockage illimité en laissant le site de StocaMine en l'état ;
- stockage illimité avec mise en place de mesures de maîtrise des risques (MMR ou « barrières de sécurité »), destinées à isoler le stockage du reste de l'exploitation.

Le scénario de stockage avec barrières prend en considération, dans son analyse de risques, les travaux relatifs à la mise en place de barrière ouvragées (stabilisation des galeries de mine, construction des barrières, suppression de la zone de terrains endommagés à leur emplacement...) ainsi que ceux liés à la fermeture définitive du site.

Pour les besoins de cette phase de comparaison, les experts de l'Institut ont précisé les hypothèses d'ennoyage et de migration des polluants dans le stockage alsacien, en incluant la présence de barrières ouvragées qui modifieraient le volume de saumure polluée.

Les barrières ont pour fonction de retarder l'arrivée de la saumure jusqu'aux déchets pendant plusieurs siècles, au cours desquels le fluage aura réduit les vides susceptibles d'accueillir cette saumure dans le stockage (espaces entre fûts et « big-bags ») et en dehors. Compte tenu du phénomène de fluage, le volume de vides résiduels maximal estimé à l'intérieur du stockage, au moment où la saumure arrive au contact des déchets, est estimée à 7 000 m³. Dans ce cas de figure, la quantité de saumure polluée susceptible de s'écouler dans les terrains situés au-dessus du stockage est d'un volume équivalent (alors qu'il est de 7 millions de m³ dans le scénario où le site reste en l'état). En effet, l'ennoyage du stockage étant retardé par les barrières, le reste des vides sus-jacents est ennoyé avec de la saumure « saine » (non polluée par les déchets), remontant directement des vides miniers plus profonds. Par la suite, le faible débit de saumure polluée traversant les barrières est dilué dans cette saumure saine. Le débit d'écoulement de la saumure résultant du fluage est alors évalué au plus à 0,7 m³ par an.

La modification du volume de saumure en contact avec les déchets a aussi un impact sur le comportement géochimique des polluants. Dans le cas des polluants dont la solubilité est limitée par l'équilibre chimique, la même concentration sera atteinte quel que soit le volume de saumure concerné puisqu'elle est fonction de la quantité de polluants présents dans les déchets, qui reste pratiquement la même. Pour ces polluants, le potentiel de libération est le même dans les deux scénarios de stockage illimité. En revanche, les polluants dont la solubilité n'est pas limitée se libèrent intégralement et leurs concentrations sont donc directement liées au volume de saumure polluée. En d'autres termes, moins il y a de saumure, plus les concentrations sont élevées. C'est le cas pour le mercure, le chrome et peut-être l'antimoine. Dans le scénario sans barrières, les concentrations pour ces trois polluants dans la saumure présente au sein du stockage sont estimées entre 1 et 100 mg/L alors que dans le scénario avec barrières, elles atteignent entre 1 et 10 g/L²⁸.

2.2 Les conclusions de la première étude comparative

La comparaison des huit scénarios conduit à des écarts notables dans les impacts sanitaires. Ce n'est pas le cas pour l'impact environnemental, principalement lié à la pollution liée au mercure : sur une durée infinie, la perte en biodiversité est relativement la même quel que soit le scénario considéré. L'impact environnemental ne constitue donc pas un élément

²⁸ Ces concentrations correspondent aux concentrations dans la saumure qui baignent le stockage. Elles seront ensuite soumises à deux dilutions successives : lors de la remontée de la saumure polluée dans les vides au-dessus du stockage (les polluants se dilueront dans le mélange saumure polluée/non polluée) et lorsque la saumure atteindra la nappe alluviale d'Alsace où les polluants se dilueront au contact de la nappe.

discriminant du choix parmi les scénarios potentiels, lequel est exclusivement déterminé par l'impact sanitaire.

Il est important de noter que l'incertitude sur le comportement de l'antimoine est un facteur non négligeable dans l'impact des effets sanitaires à long terme du stockage, quel que soit le scénario envisagé. Toutefois, l'impact de cette incertitude est le même pour les différents scénarios.

2.2.1 Les scénarios de déstockage total

L'analyse comparative révèle que l'élément déterminant dans l'impact sanitaire réside dans les deux scénarios principaux de déstockage et restockage, à Heilbronn ou à Herfa-Neurode. Les variantes (restockage des déchets de classe 1 à Drambon ; déstockage hors bloc 15) ne changent pas de manière significative l'indicateur global ; dans les différents cas, elles restent du même ordre de grandeur. En effet, les polluants qui s'avèrent des facteurs déterminants pour l'impact sanitaire et environnemental global à long terme, relèvent des déchets de classe 0 qui doivent être nécessairement stockés en sous-sol. L'impact des déchets de classe 1 stockés à Drambon reste très faible. Toutefois, dans la seconde variante, l'incertitude sur la faisabilité du déstockage du bloc 15 demeure, faute de données : l'impact comparé de cette étape est très vraisemblablement sous-estimé.

La **mine d'Heilbronn** est autorisée à stocker des déchets ultimes depuis 1992 à hauteur de 50 000 tonnes par an, soit un stockage existant d'environ 1 million de tonnes. Le volume de vides estimé de la mine atteint aujourd'hui 68 à 88 millions de m³ (calculés sur la base des 1 à 2 millions de m³ exploités par an). Les experts de l'INERIS pensent que le phénomène de fluage est probablement plus lent à Heilbronn que dans le cas du site de StocaMine, compte tenu de la nature des roches présentes, de la faible profondeur et de la technique d'exploitation minière (chambres et piliers).

Les scénarios de déstockage/restockage à Heilbronn sont l'objet d'une incertitude forte : l'exploitant du site postule que la mine de sel d'Heilbronn restera un environnement sec et ne subira pas d'ennoyage. Dans cette hypothèse, l'impact à long terme du stockage de déchets serait nul. L'Institut a privilégié une autre hypothèse, celle d'un ennoyage similaire au site de StocaMine, sur la base de plusieurs constats : la présence d'eau souterraine à proximité de la mine (nappe salée et aquifères d'eau douce) et la communication avec une ancienne mine proche (1,5 km) qui a déjà fait, dans le passé, l'objet d'un envahissement accidentel par l'eau. Dans cette hypothèse d'ennoyage, il est possible que la saumure envahisse le site avant que le fluage ait pu refermer les vides miniers. Par conséquent, pour les dix polluants concernés, ont été utilisées la même cinétique de rejet et les mêmes concentrations que celles calculées pour le cas de StocaMine sans barrières.

La **mine d'Herfa-Neurode** est autorisée à stocker des déchets ultimes à hauteur de 200 000 tonnes/an. Le stockage a débuté en 1972 au sein de l'exploitation (par la technique de chambres et piliers) d'une couche de potasse à 600 mètres de profondeur. L'épaisseur globale de la formation salifère au sein de laquelle le stockage est réalisé est de 300 à 400 mètres. Une couche de roche imperméable de 50 m d'épaisseur sépare le sel des aquifères situés au-dessus (l'aquifère le plus proche du stockage se trouvant à 150-250 mètres). La superficie du stockage est d'environ 20 km² pour une superficie totale de la mine de 400 km² dont 130 km² de galeries. En 2011, la masse de déchets stockée est d'environ 2,75 millions de tonnes pour un volume disponible total de 6 millions de tonnes environ. Les déchets de StocaMine ne représenteraient donc que 0,4 % à 1,5 % du total selon les différentes hypothèses de remplissage du site. Compte tenu du mode de remplissage des

chambres et de fermeture des zones, les experts de l'Institut estiment un volume de vides résiduels de 33 % au terme de l'exploitation soit 2 millions de m³.

L'analyse a eu recours à la même cinétique de rejet et aux mêmes concentrations de polluants que pour le site de StocaMine avec barrières. Le site d'Herfa-Neurode présente, en effet, des caractéristiques plus favorables ; les chambres de stockage pleines sont isolées par un mur de briques maçonnées ou séparées des autres par des barrières de sel ; chaque chambre est remplie quasiment jusqu'au toit, limitant les vides résiduels ; en cas d'envoyage, le volume d'eau en contact avec les déchets sera donc faible. Il en résulte que l'impact obtenu est, parmi les scénarios étudiés, l'un des plus faibles, en termes d'effets sanitaires des déchets proprement dits, identique à celui de StocaMine avec barrières. Mais les phases d'intervention, manutention, reconditionnement et surtout de transport liés au déstockage ont un impact sanitaire non négligeable qui s'ajoute au précédent. Ce facteur est d'autant plus important dans le cas d'Herfa-Neurode qu'il s'agit du site le plus éloigné de StocaMine (au regard du site d'Heilbronn). L'impact des opérations de déstockage-transport-restockage est aussi important que les effets à long terme, une fois les déchets restockés.

2.2.2 Les scénarios de stockage illimité

Le scénario de stockage illimité en laissant le site en l'état (sans barrières) est le scénario qui engendrerait les impacts les plus élevés, mesurés en DALY et PDF.m².an. Son impact sanitaire est particulièrement marqué par rapport à tous les autres scénarios. Ce scénario n'est donc pas pertinent.

Le scénario de stockage illimité avec barrières sur le site de StocaMine présente le même intérêt que le stockage à Herfa-Neurode, si l'on ne considère que les effets à long terme du stockage. En revanche, les étapes de stabilisation de la mine et d'interventions pour mettre en œuvre des barrières et préparer la fermeture de la mine ont des impacts négligeables, comparativement aux opérations de déstockage-transports-restockage d'Herfa-Neurode qui induisent des impacts supplémentaires à court terme.

En outre, dans l'hypothèse d'un envoyage de la mine d'Heilbronn, les effets sanitaires à long terme du stockage de déchets sont beaucoup plus importants en cas de stockage à Heilbronn que sur le site de StocaMine doté de barrières. A ce facteur s'ajoute l'impact des opérations de déstockage-transport-restockage, applicable également à Heilbronn, bien qu'il soit moins fort que dans le cas d'Herfa-Neurode du fait d'une distance moindre.

2.3 Modélisation géochimique

L'Institut a eu recours à un exercice de modélisation numérique pour répondre à deux objectifs : le premier consiste à estimer la masse de contaminants au sein du stockage de StocaMine susceptibles d'être libérés. Cette estimation a été intégrée comme donnée dans la comparaison des scénarios. Le second objectif vise à évaluer le rejet de contaminants dans la nappe d'Alsace, en particulier dans l'optique de vérifier la pertinence des solutions envisagées et éventuellement de les améliorer. Ces modélisations ont été calculées pour le scénario de stockage illimité de la première étude et pour les scénarios de déstockage de la seconde étude.

Par rapport au second objectif, le travail a consisté à modéliser les concentrations potentielles de polluants dans le stockage, susceptibles de remonter par les puits jusqu'à la nappe d'Alsace. Cette première étape de la modélisation s'est fondée sur les données de l'étude géochimique, qui soulignent notamment le risque potentiel présenté par certains polluants comme le mercure, le chrome et l'arsenic. Dans un second temps, l'Institut a utilisé

le modèle MARTHE du BRGM, qui modélise l'écoulement de la nappe alluviale d'Alsace, pour étudier le comportement de ces rejets (panache de pollution) au sein de la nappe.

Dans le cas de la première étude, la modélisation des rejets de polluants dans la nappe a permis d'améliorer la stratégie des mesures de maîtrise des risques de la solution de stockage illimité avec barrières, en fournissant des éléments de dimensionnement de ces barrières. Un résultat intermédiaire de simulation de transport des contaminants, tenant compte de premières hypothèses techniques, a montré que les critères de qualité de l'eau pouvaient être localement dépassés pour un polluant, le mercure. Ce premier résultat a permis de définir les caractéristiques que doivent avoir les barrières pour que le débit de polluant, lors de son arrivée dans la nappe, ne conduise pas à un dépassement des critères de qualité de l'eau, et cela avec une marge de sécurité importante.

3. Scénarios complémentaires de déstockage

3.1 Présentation de la seconde étude comparative

Les scénarios de déstockage de la première étude ne différaient que par le lieu de destination des déchets déstockés : tous les déchets étaient déstockés, seuls ceux du bloc 15 restant sur le site de StocaMine (bloc dont l'accès est jugé dangereux du fait de l'incendie et d'instabilités mécaniques importantes). La seconde étude vient compléter les scénarios de déstockage, avec l'examen de scénarios différant par la quantité et la nature des déchets déstockés, leur lieu de destination étant cette fois-ci unique.

L'Institut a conduit ses travaux en comparant cinq scénarios fournis par StocaMine. Le lieu unique de destination, la mine allemande de Sondershausen (Thuringe), est un choix de l'exploitant et l'Institut s'est fondé, pour son analyse, sur les éléments d'information contenus dans le rapport de Bernard Feuga réalisé en 2010. De même, la partie des scénarios relative au déstockage (notamment les données concernant le personnel affecté aux travaux et concernant la durée des travaux) a été examinée à partir des éléments additionnels d'information transmis par StocaMine.

Les scénarios de déstockage ont été étudiés en deux phases. Dans une première phase, l'analyse a porté sur deux scénarios de déstockage de déchets contenant du mercure et de l'arsenic, polluants considérés comme pouvant avoir le plus d'impact sur la nappe d'Alsace. Lors de la deuxième phase, trois scénarios complémentaires ont été examinés. Ces cinq scénarios constituent donc un ensemble de possibilités graduelles, du stockage illimité au déstockage total hors bloc 15.

A noter, les estimations (exprimées en pourcentage) de la masse de mercure contenue dans les déchets ciblés par les scénarios ont été calculées par StocaMine.

- V1 – déstockage des déchets arséniés et mercuriels des blocs 21 et 22 correspondant, au déstockage de 56 % de la masse de mercure ; il s'agit des déchets les plus facilement accessibles sans devoir déstocker d'autres déchets dangereux, comme les déchets amiantés (qui nécessitent des conditions d'extraction spécifiques) ;
- V2 - déstockage des déchets arséniés et mercuriels des blocs 12, 21, 22 et 23, l'ensemble correspondant à 93 % de la masse de mercure ;
- V3 – déstockage de tous les déchets des blocs 21 et 22 ; ce scénario entraîne le déstockage d'une partie des déchets contenant de l'amiante ;

- V4 – déstockage de tous les déchets des blocs 12, 21, 22 et 23 ; ce scénario entraîne le déstockage d'une partie des déchets contenant de l'amiante ;
- V5 – déstockage de tous les déchets, à l'exception de ceux du bloc 15 dont l'accès est jugé trop dangereux pour les travailleurs.

L'INERIS a eu recours à la même méthodologie que celle utilisée pour la première étude. Il est important de rappeler que cette méthodologie, qui s'applique à une échelle de temps infini, ne prend pas en considération les aspects réglementaires, sanitaires ou environnementaux contraints par des valeurs limites, guides ou autorisées. Elle part du principe qu'une masse de substance dispersée dans l'environnement produit des effets sanitaires qui peuvent être traduits dans un indicateur global de risques.

Pour ces cinq scénarios, les statistiques d'accidentologie sont les mêmes que pour la première étude comparative. Comme dans l'étude précédente, les impacts sur le changement climatique, sur la qualité de l'air, sur les ressources naturelles et les impacts relatifs aux enjeux juridiques, financiers et sociopolitiques n'ont pas été pris en compte.

L'examen des scénarios de cette seconde étude n'a, en revanche, porté que sur l'impact sanitaire, l'impact environnemental, n'étant pas un élément discriminant pour le « classement » des scénarios (conclusion de la première étude). De même, l'incertitude liée à l'antimoine, prise en compte dans la première étude, n'a pas été reprise dans la seconde, puisqu'elle n'a pas d'incidence sur la hiérarchie des scénarios.

Enfin, les hypothèses qui portent sur la quantité de contaminants contenue dans les déchets ont été affinées. La composition des déchets tient compte, pour chaque lot, de la masse de contaminants (les masses de palettes, fûts et plâtres ont été soustraites afin d'obtenir la masse nette de déchets). Ainsi la valeur obtenue est aussi proche que possible de la masse réelle stockée et déstockée. Les hypothèses de quantités n'étant pas strictement les mêmes, les valeurs d'indicateur d'impact sanitaire obtenues dans l'une et l'autre étude ne sont pas directement comparables.

3.2 Les conclusions de la seconde étude comparative

Il a été supposé que le comportement géochimique des déchets restockés à Sondershausen était identique au scénario de stockage illimité sur le site de StocaMine avec barrières (faible pourcentage de vides résiduels faibles, postulat identique à celui appliqué au cas d'Herfa-Neurode dans la première étude).

La **mine de Sondershausen** a commencé à stocker des déchets pour palier l'aléa mouvements de terrain dès sa fermeture en 1992. Depuis 2005, elle est autorisée pour l'élimination de déchets ultimes. Le stockage se situe dans une ancienne exploitation de potasse contenue au sein de formations évaporitiques épaisses de 200 à 300 mètres. La couche de potasse a été exploitée par chambres remblayées séparées par des piliers longs, puis par chambres et piliers. L'aquifère supérieur le plus proche du stockage se trouve à environ 300 mètres au-dessus du stockage. Plusieurs quartiers de la mine permettent le stockage ; à l'issue du « remblayage » (remplissage par les déchets), les quartiers sont isolés du reste de la mine par des barrages en sel de 25 mètres de longueur. Ces barrages ont fait l'objet d'essais et font également l'objet d'une surveillance continue. Le mode de remblayage utilisé laisse, à la fin du remplissage d'un quartier, peu de vides résiduels.

L'analyse des scénarios de déstockage a confirmé que les effets à long terme à StocaMine et à Sondershausen étaient du même ordre de grandeur. La hiérarchisation des scénarios

résulte donc, comme dans la première étude, des risques et impacts des phases de déstockage-transport-restockage.

Les travaux de manipulation et transport de déchets prennent une part de plus en plus importante dans l'indicateur d'impact sanitaire selon que la masse déstockée-restockée augmente. Autrement dit, plus il y a de déchets déstockés, plus le scénario a un impact élevé : le scénario du déstockage total hors bloc 15 présente l'indicateur d'impact sanitaire le plus élevé et le scénario de déstockage des seuls déchets arséniés et mercuriels des blocs 21 et 22 présente l'indicateur le plus faible.

A noter, la part de l'indicateur liée au transport, par rapport à la première étude, est augmentée d'environ 20 % car la mine de Sondershausen est plus éloignée du site de StocaMine que les mines d'Heilbronn et d'Herfa-Neurode. Par ailleurs, les statistiques d'accident lors des opérations de manipulation prennent en compte le risque physique et le risque chimique mais les résultats peuvent varier en fonction du nombre réel de personnes affectées à un poste donné.

Il est important de rappeler que la méthodologie utilisée permet d'évaluer de manière homogène et simple un indicateur global de risques pour chacun des scénarios et de les situer les uns par rapport aux autres. Une fois cette démarche réalisée, le scénario choisi doit être examiné de manière approfondie, en prenant en compte les contraintes réglementaires, sanitaires et environnementales et en cherchant à réduire les risques avec la mise en place de mesures de maîtrise des risques (MMR).

3.3 Modélisation géochimique complémentaire

Un second exercice de modélisation géochimique du terme source (nature, quantité et comportement des rejets) a été réalisé en fonction des cinq scénarios de déstockage. Il prend en compte l'évolution des masses de déchets, des quantités de contaminants et des concentrations à l'équilibre dans la saumure du stockage, doté de barrières. Cette évolution est étudiée pour les cinq options de retrait partiel de déchets mercuriels et arséniés, comparativement au scénario de stockage illimité. Douze contaminants métalliques ont été examinés (mercure, chrome, antimoine, arsenic, cadmium, baryum, plomb, bismuth, cobalt, nickel, cuivre, argent), ainsi que les cyanures. A la suite de ce calcul de concentration du terme source (concentrations des contaminants dans la saumure du stockage), une seconde simulation a modélisé l'impact potentiel sur la nappe d'Alsace.

Il ressort que les scénarios de déstockage étudiés réduisent les concentrations de mercure dans la saumure du stockage, mais avec pour conséquence, dans certains cas, l'augmentation des concentrations d'autres polluants.

Dans le cas du retrait des déchets arséniés et mercuriels des blocs 21 et 22 (scénario 1), le déstockage de 56 % de la masse de mercure divise par deux les concentrations de mercure dans la saumure du stockage.

Dans le cas du retrait de ces mêmes déchets arséniés et mercuriels des blocs 12, 21, 22 et 23 (scénario 2), soit 93 % de la masse de mercure, les concentrations dans la saumure sont réduites d'un facteur 10. En revanche, le cyanure, rendu disponible, provoque, par des phénomènes de complexation, une augmentation des concentrations de cadmium, cobalt et nickel.

Le retrait de tous les déchets des blocs 21 et 22 (scénario 3) conduit à un résultat identique à celui du scénario 1, à la différence que les concentrations de nickel augmentent dans la saumure.

Le déstockage de tous les déchets des blocs 12, 21, 22, 23 (scénario 4) aboutit à des résultats avec des concentrations en cobalt, cadmium, argent, antimoine, cyanure, chrome et mercure légèrement supérieures au scénario 2.

Le retrait total des déchets hors bloc 15 (scénario 5) conduit à des concentrations de contaminants dans la saumure quasi identiques à ceux du scénario de stockage illimité (avec barrières), sauf pour les concentrations en cyanure et en mercure, qui sont 20 fois plus faibles.

Cette étude a permis de souligner que la connaissance précise des quantités de cyanure est un enjeu essentiel. En l'absence de données, il serait souhaitable de retirer les déchets de type sels de trempe. Par ailleurs, elle confirme que l'évaluation de l'impact sanitaire et environnemental doit correctement prendre en compte la diminution des concentrations induites par le déstockage, car cette diminution détermine le flux de contaminants migrant vers la nappe d'Alsace. De même, une bonne connaissance des quantités totales restant dans le stockage est indispensable pour le dimensionnement des barrières car ces quantités déterminent la durée pendant laquelle le flux de saumure contaminée va être émis.

Concernant la modélisation du panache de dispersion des contaminants dans la nappe d'Alsace, les résultats montrent que les cinq scénarios de déstockage partiel ne conduisent à aucun dépassement des critères de qualité réglementaires, avec une marge de sécurité importante.

III. Préconisations de l'INERIS

L'Institut rappelle que, quelle que soit la solution retenue, il se produira très probablement, à terme, un phénomène de transfert des polluants dans l'environnement. L'enjeu est donc de mettre en œuvre une solution limitant ce transfert dans des proportions où les polluants n'auront pas ou peu d'impact sur la santé humaine et l'environnement.

A l'issue de la première étude comparative, le scénario ayant le moins d'impact est celui du maintien illimité du stockage sur le site de StocaMine avec la mise en place associée de barrières. Cela tient en particulier au fait que ce scénario évite les risques liés à des opérations de déstockage-transport-restockage.

Selon les études menées par l'INERIS entre 2009 et 2011, les sites de StocaMine et d'Herfa-Neurode en Allemagne engendrent un impact sanitaire et environnemental identique (pour les 44 000 tonnes de déchets du site alsacien exclusivement). L'Institut insiste sur le fait que cette conclusion est assortie d'une condition impérative : la mise en place d'une stratégie de mesures de maîtrise des risques efficace. Sur la base de cette conclusion, StocaMine a, dans un premier temps, demandé à l'INERIS d'approfondir ses travaux sur le seul scénario de stockage illimité à Wittelsheim avec mise en place de barrières.

StocaMine a par la suite demandé à l'Institut de conduire des études complémentaires portant sur des scénarios de déstockage partiel et de restockage à Sondershausen. Ces études montrent que l'impact sanitaire à long terme, sur le site de StocaMine et sur le site de Sondershausen, reste à peu près le même quels que soient ces scénarios. Les phases de manipulation et transport des déchets représentant une part importante de l'impact ; c'est le scénario qui déplace le moins de déchets qui aura le moins d'impact.

A l'issue de l'ensemble des études, dans l'hypothèse du maintien du stockage sur le site de StocaMine comme dans l'hypothèse d'un déstockage partiel des déchets, l'INERIS recommande de mettre en œuvre une stratégie de réduction des risques, avec la mise en place de barrières autour du stockage.

Quelle que soit la solution retenue dans le cadre du dossier de fermeture, l'Institut souligne enfin la nécessité d'une prise de décision rapide sur le devenir du stockage de déchets. Les conclusions de l'étude géomécanique stipulent en effet que les instabilités du toit (décollements de bancs), du mur (soufflage) et des piliers de galeries devraient s'accroître à des rythmes très variables, susceptibles de rendre l'accès au site, le retrait éventuel des déchets et les travaux souterrains très risqués, voire impossibles.

1. La stratégie de réduction des risques

L'Institut préconise la mise en place de mesures de maîtrise des risques (MMR) sur le site de StocaMine fondées sur l'installation de « bouchons » ou barrières ouvragées constituées d'argiles gonflantes, très peu perméables, en périphérie immédiate du stockage pour isoler les déchets. En complément, il convient d'étudier le maintien d'un « court-circuit hydraulique », par l'aménagement d'une voie d'écoulement privilégiée pour la saumure au sein de galeries parallèles au stockage.

En présence de barrières, le volume de saumure potentiellement polluée est estimé à 7 000 m³. Dans ce cas, les conclusions de l'étude géochimique montrent pour certains polluants (mercure, chrome et peut-être antimoine) que, moins il y a de saumure, plus les

concentrations seront élevées. L'enjeu pour la stratégie de réduction de risques est donc de laisser migrer vers la nappe d'Alsace les quantités de polluants les plus faibles possibles.

Le dispositif de barrières aura pour vocation de retarder aussi bien l'entrée dans le stockage de la saumure saine que la sortie de la saumure polluée, ceci le plus longtemps possible pendant et après l'envoyage du niveau géologique du stockage, si possible jusqu'à l'achèvement du phénomène de fluage. La stratégie des MMR se fonde en effet sur un constat : l'écoulement est essentiellement contrôlé par le fluage, qui se ralentit avec le temps du fait de la compaction des déchets dans le stockage et de celle des terrains foudroyés dans l'exploitation. Lorsqu'il n'y a plus de fluage, il subsiste un phénomène de transport très lent de la saumure polluée par diffusion mais dont l'impact peut être négligeable.

Les caractéristiques des barrières doivent être envisagées pour retarder l'envoyage du stockage et retenir la saumure polluée jusqu'au comblement de tous les vides. Ce retard permettra une meilleure compaction des déchets (réduction des vides)²⁹. Une fois le stockage envoyé, les déchets compactés et la saumure constitueront une opposition au fluage des parements du stockage et ralentiront ainsi la sortie de la saumure polluée. Les barrières ont, par ailleurs, vocation à réguler le transfert des polluants, de sorte que les critères de qualité de la nappe d'Alsace ne soient pas dépassés : ainsi, pour une masse totale de sels de mercure au sein des déchets estimée à 53 tonnes, il est nécessaire de retarder l'envoyage d'un millier d'années, en tenant compte d'une défaillance éventuelle de l'étanchéité du système. Au bout d'environ 1 000 ans, le fluage aura, en effet, suffisamment diminué d'intensité pour que les polluants qui atteindront la nappe ne contribuent pas au dépassement des critères de qualité réglementaires. De ce fait, les barrières doivent être conçues *a minima* pour isoler le stockage sur cette même durée.

La mise en place de barrières ouvragées à base d'argiles gonflantes présente deux avantages : en présence de saumure saturée, ce type d'argile demande un temps très important d'hydratation avant de laisser passer la saumure et, une fois saturé, ce matériau n'autorise le passage que d'un débit de saumure très faible, compte tenu de ses caractéristiques de perméabilité, permettant autant que possible au fluage du sel de continuer à compacter les déchets. Parallèlement, le fort contraste entre la résistance hydraulique des barrières et celle du « court-circuit » aménagé en parallèle (voir plus loin) conduirait une grande partie de la saumure saine à remonter vers les niveaux supérieurs à travers les galeries servant de voies d'écoulement.

2. Les mesures de maîtrise des risques préconisées

2.1 Vérification de l'état du toit et des parements du stockage

Des dégradations sont visibles sur le toit des chambres du stockage, notamment dans les blocs 15, 25 et 26 où un décollement important des bancs a eu lieu. Le risque de chutes de blocs y est important et soulève le problème de la sécurité des travailleurs. Une méthode d'auscultation endoscopique et des mesures de perméabilité permettent de vérifier l'amplitude et l'étendue de la zone endommagée au toit du stockage et dans les parements des voies d'accès. L'endoscopie est une technique adaptée pour vérifier que l'extension du décollement du toit du stockage n'atteint pas le niveau exploité au-dessus et laisse bien une distance ne permettant pas de mettre en communication le stockage et le niveau exploité par le sondage d'endoscopie lui-même.

²⁹ L'envoyage ralentissant le phénomène de fluage, sa survenue tardive permettra au fluage de refermer les vides entre les colis de déchets autant que possible.

2.2 Barrières ouvragées

La principale mesure de maîtrise des risques qui consiste en la mise en place de barrières à très faible perméabilité est une opération qui demande une attention particulière ; elle nécessite la construction de barrières ouvragées dans chacune des 21 voies d'accès au stockage. Ce dispositif doit être conçu et dimensionné par un bureau d'études spécialisé. Il convient de choisir un matériau dont les propriétés conduisent à une étanchéité croissante au cours de son hydratation. Elle est plus faible en présence de saumure mais il est néanmoins possible d'obtenir une pression de gonflement permettant d'assurer au stockage un degré d'étanchéité suffisant. Le dispositif nécessite donc de calculer avec précision le rapport perméabilité/longueur des barrières pour qu'elles puissent retarder l'entrée dans le stockage de la saumure intacte et la sortie de la saumure polluée au moins 1 000 ans. La conception de ces barrières doit également tenir compte du fait qu'elles seront soumises à des fortes sollicitations mécaniques à long terme, en raison du fluage du sel.

2.3 Suppression de la zone endommagée autour des galeries du stockage

Afin d'éviter tout court-circuit hydraulique des barrières via la zone endommagée présente autour des galeries aux emplacements où elles seront construites, il faut veiller à ce que la perméabilité de cette zone ne soit pas supérieure à celle des barrières. Pour cela, il serait nécessaire de surexcaver les tronçons de galeries où les barrières seront positionnées. Compte tenu de la présence de galeries d'infrastructure doubles ou triples, cette opération est délicate : elle ne doit pas créer de nouvelles fissurations ou instabilités. Elle doit faire l'objet d'une ingénierie par un bureau d'études spécialisé.

2.4 Court-circuit hydraulique

Un moyen de maîtrise des risques complémentaire aux barrières consiste à créer des courts-circuits hydrauliques autour du stockage, de façon à ce qu'ils présentent toujours (y compris sur le long terme) une perméabilité très grande comparée à celle des barrières. Deux galeries existantes délimitant le stockage et situées sur le chemin emprunté par la saumure pourraient servir de court-circuit. Leur fermeture hydraulique serait empêchée à long terme grâce à un remplissage approprié (par exemple, par des gros galets rocheux ou tout autre matériau inerte et mécaniquement résistant et doté d'une perméabilité élevée). Ce dispositif doit également faire l'objet d'une étude d'ingénierie.

2.5 Suivi de l'ennoyage

L'ennoyage du secteur ouest des MDP A hébergeant le stockage a vraisemblablement commencé vers les années 1950, à l'occasion de la fermeture des premiers puits. Toutefois, le niveau et la vitesse de l'ennoyage ne peuvent pas être actuellement précisés faute de dispositif de mesure. Il conviendrait donc de mettre en place un système de surveillance piézométrique³⁰ à long terme. Cela nécessiterait la réalisation de quelques forages traversant les secteurs susceptibles d'être ennoyés et non encore entièrement fermés. Ils seraient équipés en piézomètres et devraient être entretenus pendant plusieurs siècles, au moins jusqu'à la fin de l'ennoyage. A court terme, les données recueillies permettraient d'ajuster les modèles prédictifs et d'affiner la prévision de l'impact du stockage sur la longue durée.

2.6 Fermeture des deux derniers puits

³⁰ Le piézomètre est un dispositif de mesure (généralement installé dans un forage) servant à mesurer le niveau de l'eau souterraine.

Seuls deux puits (Joseph et Else) sont encore ouverts sur l'ensemble des 15 puits d'accès au secteur ouest des MDPA. La qualité de traitement et l'étanchéité de ces derniers puits ne sont pas de nature à modifier sensiblement l'impact du stockage sur la nappe d'Alsace : en effet, si l'étanchéité de ces puits était assurée, la saumure emprunterait le chemin à plus faible résistance hydraulique offert par les trois autres puits proches du stockage et déjà remblayés (Amélie I, Amélie II et Max). Toutefois, il convient de mettre à profit les progrès techniques récents en matière de comblement des puits et de profiter que ces puits sont encore ouverts pour mettre en place des dispositifs de surveillance à long terme, tant au fond, au sein du stockage, qu'à la traversée de la nappe d'Alsace. En plus de la surveillance piézométrique, ces dispositifs permettraient de réaliser des prélèvements d'eau destinés à l'analyse chimique.

2.7 La question de l'ancien sondage WIII et des trous de dégazage

La couche de sel située au-dessus du stockage est un horizon naturellement imperméable. Néanmoins, elle a été traversée par plusieurs sondages anciens réalisés pour la reconnaissance du gisement de potasse. Parmi ces sondages, un seul (WIII) se trouverait à l'intérieur de la zone de stockage. Il a été réalisé en 1905 et rebouché à l'époque par injection d'argile dans la boue de forage. Ce sondage n'est pas visible au sein du site de stockage et, selon les informations dont l'Institut dispose, il devrait se trouver dans un pilier du bloc 25, non rempli de déchets.

Une étude spécifique réalisée par l'INERIS a montré que ce sondage ne constituerait pas une voie de transfert de saumure polluée, à la condition que son matériau de remplissage soit solidifié. Dans ce cas, le débit de saumure polluée pouvant s'y infiltrer depuis le stockage et migrer vers des horizons supérieurs de travaux miniers anciens serait négligeable comparé au débit de sortie à travers les barrières d'argile. En revanche, si le matériau de remplissage est resté à l'état de boue, le sondage peut constituer une voie de transfert de la saumure polluée entre le stockage et l'ancienne exploitation sus-jacente, du fait du fluage, pour peu que l'écoulement puisse se faire du stockage vers le sondage. L'étude montre que le temps nécessaire à la fermeture naturelle complète du sondage est, en effet, de six siècles, à compter de son creusement, durée qui pourrait dépasser celle de l'ennoyage (trois siècles). Dans ce cas de figure, le temps nécessaire à la formation d'une communication hydraulique entre le stockage et l'exploitation située à l'aplomb serait d'un an. La sortie de la saumure serait d'autant plus rapide que le diamètre du sondage est petit et qu'il se réduit par fluage ; le débit serait imposé par la vitesse de fluage et ce, d'autant plus si le sondage est la seule voie de communication hydraulique.

L'INERIS a préconisé de prendre des dispositions, dans les meilleurs délais, afin de localiser le sondage WIII, de vérifier l'état de son matériau de remplissage et de le traiter le cas échéant. Si le traitement du sondage ne peut être réalisé pour des raisons de faisabilité technique ou des contraintes de sécurité (instabilité du toit du bloc 25), il serait nécessaire de mettre en place une barrière étanche autour du pilier concerné. Dans le cas où la reconnaissance, le traitement du sondage ou la mise en place d'une barrière seraient inenvisageables, il est indispensable de mener une étude spécifique en intégrant les résultats de l'endoscopie du toit et des mesures de perméabilité déjà préconisées. Cette étude serait destinée à évaluer le risque de transport de polluants, au cas où ce sondage serait en communication avec la saumure polluée. Cette communication pourrait avoir lieu à travers une zone endommagée présente en paroi du pilier dans lequel se trouve le sondage ou dans le du toit du stockage (bancs décollés).

Il existe également des trous de sondages dits « trous de dégazage de grisou » réalisés par les mineurs dans le toit des galeries des MDPAs, y compris dans les chambres de stockage de déchets. L'INERIS en a étudié la vitesse de fermeture dans le temps par fluage. L'Institut a conclu que leur fermeture complète n'interviendra que dans 5 à 6 siècles : ils ne seront donc pas entièrement fermés lorsque le niveau d'envoyage atteindra le toit du stockage, selon les hypothèses actuelles. Toutefois, les trous de dégazage débouchent dans la couche de marne située à une dizaine de mètres au-dessus du toit du stockage et une distance de garde suffisante existe entre l'extrémité des trous et l'exploitation sus-jacente (les trous sont distants de moins de 10 m du plancher de l'exploitation). Ce niveau imperméable ne permet théoriquement pas de communication hydraulique, dans le sens vertical, entre le stockage et les vides miniers de l'exploitation ; la résistance hydraulique du toit demeure supérieure à celles des barrières envisagées.

Au cours de sa mission, l'Institut a insisté sur le fait que ce point devait être confirmé par des investigations complémentaires, en particulier par l'endoscopie du toit et par des mesures de perméabilité. Ces investigations, menées par l'exploitant, ont pour objectif de s'assurer de l'absence de toute voie de communication au toit du stockage pouvant constituer un court-circuit hydraulique autour des barrières.

Les résultats de ces deux types d'investigations devront être pris en compte dans l'évaluation de l'impact du stockage sur la pollution potentielle de la nappe d'Alsace.

2.8 Remblayage des blocs restés vides ou vidés de leurs déchets (déstockage)

Les blocs 15, 25 et 26 présentent un toit instable très affecté par le décollement des bancs, pouvant donc donner lieu, à terme, à une descente importante du toit sur toute la hauteur du bloc (2,8 m). Afin d'éviter la progression de ce décollement, dans le temps et dans l'espace, vers le niveau d'exploitation sus-jacent, il serait prudent de procéder à un remblayage de ces blocs non remplis de déchets (sauf partiellement pour le bloc 15), à l'aide d'un matériau inerte. Ce matériau aurait pour vocation de limiter la descente du toit sans présenter nécessairement de propriétés particulières notamment en termes de perméabilité. Cette disposition a pour objectif de préserver l'étanchéité de la partie supérieure du toit du stockage qui n'est pas traversée par des trous de dégazage.

Dans le cas des scénarios de déstockage partiel, il reste des blocs vidés après extraction des déchets, qui doivent faire l'objet des mêmes précautions que celles préconisées dans le cas des blocs initialement vides.

2.9 Interdiction de pompage

Une mesure de sécurité supplémentaire consiste à prévoir, en surface, une surveillance ainsi que des servitudes et restrictions d'usage autour de tous les ouvrages susceptibles de diffuser de la saumure polluée dans la nappe d'Alsace. Il s'agit des 5 puits de la mine Amélie et des piézomètres destinés à la surveillance. Outre la mise en place de la surveillance de la qualité de l'eau à l'aval des puits de la mine Amélie, des dispositions devront être prévues dans l'éventualité d'une défaillance des MMR conduisant à un dépassement imprévu des critères de qualité. La plus simple consistera en la mise en place d'un piège hydraulique (pompage de la saumure polluée et traitement avant rejet) après création d'une enceinte étanche autour du puits concerné. Même si ce genre de dispositions est d'usage courant à court et moyen termes, le dispositif devra faire l'objet d'une étude préalable par un organisme spécialisé. Enfin, la mise en place de servitudes à proximité des puits (interdisant

notamment tout pompage de l'eau, voire l'utilisation du sol) constituera une sécurité complémentaire.

En effet, même si les concentrations prévisibles en polluants de la nappe d'Alsace sont inférieures aux critères de qualité, du fait de la dilution importante qui se crée, elles pourraient être plus importantes dans l'éventualité d'un pompage localisé trop près des points de sortie (effet d'« aspiration »). Le dimensionnement de ces servitudes devrait également faire l'objet d'une étude spécifique.

Etudes réalisées entre 2009 et 2013 pour StocaMine

GOMBERT P. - Stockage souterrain de StocaMine (68). Synthèse critique des études hydrogéologiques sur l'ennoyage du site – INERIS-DRS-10-108130-03801A – Mars 2010

LAOUFA F. - Analyse critique des études géomécaniques du stockage de StocaMine – INERIS-DRS-10-108130-04240A – Avril 2010

HULOT C., QUIOT F., HENNEBERT P. - Stockage souterrain de StocaMine (68) - Synthèse critique : thématiques « Impact sur la santé humaine des populations hors travailleurs du site de StocaMine » et « Impact sur la ressource en eau » - INERIS-DRC-10-108130-03798A – Avril 2010

LAOUFA F. - Etude géomécanique du stockage de StocaMine – INERIS-DRS10-108130-14273A – Décembre 2010

NEDELEC B. - Fermeture du stockage de déchets ultimes de StocaMine - Etude de faisabilité technique pour les différentes options logistiques des déchets vers les centres de stockage – INERIS-DRA-10-108130-13583A – Février 2011

GOMBERT P. - Stockage souterrain de StocaMine (68) - Etude hydrogéologique de l'ennoyage du site – INERIS-DRS-10-108130-12810B – Mars 2011

HENNEBERT P. - StocaMine - Evaluation du terme source dans le scénario du stockage illimité : calculs des quantités de contaminants stockés, et des concentrations potentielles en solution et en phase gazeuse en cas d'ennoyage - INERIS-DRC-10-108130-12610B – Novembre 2011

QUIOT F. - Interprétation Campagnes de prélèvements des eaux d'infiltration effectuées par l'INERIS au fond de la mine Amélie en juillet et septembre 2010 - INERIS-DRC-11-108130-06358B – Septembre 2011

Présentations faites au COPIL les 19 novembre 2010 [58a], 9 décembre 2010 [58b], 20 janvier 2011 [58c], 28 février 2011 [58d], 1^{er} avril 2011 [58e], 23 mai 2011 [58f] – Disponibles aussi sur <http://www.stocamine.com>

LAOUFA F. - Estimation de la convergence du sondage W3 et des trous de dégazage au toit du stockage de StocaMine – INERIS-DRS-11-108130-10474A – Octobre 2011

PINTE J.C. - Comparaison des scénarios de devenir du stockage de StocaMine - INERIS – DRS-12-108130-00756A – Janvier 2012

QUIOT F. - Stockage souterrain de STOCAMINE (68) - Impact potentiel du stockage sur la ressource en eau dans le cadre du scénario de stockage illimité - INERIS-DRC-12-108130-00744A – Janvier 2012

HULOT C. - Stockage souterrain de STOCAMINE (68) Impact potentiel du stockage sur la santé des populations (hors travailleurs) dans le cadre du scénario de stockage illimité, tenant compte des impacts potentiels sur la ressource en eau et le milieu air extérieur - INERIS- DRC-12-108130-00306C – Février 2012

PINTE J.C. - Moyens de maîtrise des risques dans l'option de stockage illimité à StocaMine – INERIS-DRS-12-108130-01167B – Mars 2012

PINTE J.C. - Etude de sûreté du confinement à long terme de la matrice réceptrice compte-tenu de ses caractéristiques géotechniques – INERIS- DRS-12-108130-02769B – Mars 2012

HENNEBERT P., QUIOT F. - Modélisation complémentaire du terme source en fonction des scénarios de déstockage étudiés (5) – Tracé des panaches consécutifs à ces 5 scénarios – INERIS- DRC-13-140901-10732A – Octobre 2013

PINTE J.C. - Comparaison des scénarios relatifs au devenir du stockage de StocaMine - Etude complémentaire – INERIS- DRS-13-141706-11148A – Novembre 2013