

**ANNEXE 5 de la DEMANDE**

**EXPOSE DES  
SOLUTIONS  
ALTERNATIVES**

Deux documents constituent la présente annexe 5.

- Document INERIS DRS-12-108130-00756B (Avril 2012) :

StocaMine a demandé à l'INERIS d'examiner la solution du stockage illimité et les solutions alternatives avec leurs conséquences respectives puis de comparer ces dernières dans le but de retenir la solution présentant le moins de risques.

Pour ce faire, l'INERIS a proposé d'évaluer plusieurs scénarios relatifs au devenir du stockage en termes de risques ou impacts pour la santé humaine et pour l'environnement, sur la base des informations disponibles.

Le but étant d'aider à la décision quant au devenir du stockage, la méthode d'analyse retenue pour effectuer la comparaison des scénarios, a été fondée sur le calcul d'indicateurs globaux de risques. Ces derniers ont vocation à intégrer les effets sanitaires et environnementaux des substances rejetées dans l'environnement (sans faire particulièrement référence à des valeurs seuils réglementaires).

L'objet de ce rapport est de présenter la méthodologie de comparaison des scénarios, les différents scénarios envisagés, les sites concernés, son application et les résultats obtenus.

Pour ce faire, on trouvera successivement :

- la description de la méthodologie mise en œuvre pour comparer les scénarios et les indicateurs de comparaison ;
- l'exposé de la problématique des différents scénarios envisageables et la description de ceux qui ont été retenus pour cette analyse comparative ;
- la comparaison des scénarios proprement dite avec, successivement, les données d'entrée, les résultats et une discussion.

Durant la réalisation de cette étude, un certain nombre de présentations a été fait au Comité de pilotage (COPIL) mis en place par l'administration mi-2010 ; l'ensemble des présentations est donné en annexe du dossier. Celles qui concernent plus spécifiquement l'analyse et la comparaison des scénarios alternatifs portent les références [58a], [58d], [58e] et [58f] ; certains éléments de l'étude INERIS s'y réfèrent. Ces présentations sont également disponibles sur le site internet de MDPA-StocaMine.

A noter qu'au cours de l'étude, certaines données d'entrée ou résultats obtenus ont pu légèrement évoluer, ce qui peut expliquer les quelques différences entre ces présentations et le présent rapport. Il en va de même de la terminologie utilisée.

La numérotation des références (nombres entre crochets), par souci de cohérence et de simplification, est celle du dossier global de demande de prolongation de stockage illimité dont le rapport INERIS constitue l'une des pièces.

- Document INERIS DRS-13-141706-11148A (Novembre 2013) :

Cette étude s'inscrit dans le prolongement de l'étude de 2012 et compare des scénarios complémentaires de déstockage, selon la même méthode que dans l'étude de 2012, mais en retenant uniquement l'indicateur d'impact sur la santé humaine. Le site de re-stockage considéré est celui de Sondershausen.



RAPPORT D'ÉTUDE  
DRS-12-108130-00756B

25/04/2012

**Comparaison des scénarios relatifs au  
devenir du stockage de StocaMine**

**INERIS**

*maîtriser le risque |  
pour un développement durable |*



# **Comparaison des scénarios relatifs au devenir du stockage de StocaMine**

**Direction des Risques du Sol et du Sous-sol**

**StocaMine**



## PRÉAMBULE




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

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

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

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

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

	<b>Rédaction</b>	<b>Vérification</b>	<b>Approbation</b>
<b>NOM</b>	Jean-Claude PINTE	Christian TAUZIEDE	Mehdi GHOREYCHI
<b>Qualité</b>	Ingénieur à la Direction des Risques du Sol et du Sous-sol	Secrétaire Général	Directeur des Risques du Sol et du Sous-sol
<b>Visa</b>			

## TABLE DES MATIÈRES

<b>1. CONTEXTE ET OBJECTIF .....</b>	<b>7</b>
<b>2. MÉTHODOLOGIE DE COMPARAISON DES SCÉNARIOS.....</b>	<b>9</b>
2.1 Méthodologie .....	9
2.2 Impacts et risques pris en compte.....	11
2.3 Périmètre de l'étude.....	12
2.4 Indicateurs globaux et mode d'obtention.....	14
2.4.1 Impacts sur la santé humaine.....	14
2.4.2 Impacts sur la qualité des écosystèmes .....	15
2.4.3 Calcul des indicateurs .....	16
<b>3. PROBLÉMATIQUE ET SCÉNARIOS.....</b>	<b>21</b>
3.1 Description du scénario de déstockage ou réversibilité .....	21
3.1.1 Déstockage des déchets .....	22
3.1.2 Les sites de destination.....	23
3.1.3 Choix du mode de transport .....	24
3.1.4 Faisabilité technique de la réversibilité et sécurité du personnel .....	25
3.1.5 Résumé des dangers et risques liés à la réversibilité .....	28
3.2 Description du scénario de stockage illimité.....	30
<b>4. COMPARAISON DES SCÉNARIOS .....</b>	<b>33</b>
4.1 Données d'entrée.....	33
4.2 Détail de l'approche par scénario.....	34
4.2.1 Impact à long terme des déchets de StocaMine dans l'hypothèse de leur maintien en place (Scénarios A et B) .....	34
4.2.2 Impact à long terme du restockage des déchets (en tout ou partie) de StocaMine dans la mine allemande de Heilbronn (scénarios C, Cbis et D).....	38
4.2.3 Impact à long terme du restockage des déchets (en tout ou partie) de StocaMine dans la mine allemande de Herfa-Neurode (scénarios E, Ebis et F).....	39
4.2.4 Impact à long terme du restockage des déchets dangereux de StocaMine dans le site de Drambon (scénarios D et F).....	41
4.2.5 Risques pour les travailleurs lors du déstockage des déchets et autres travaux souterrains à StocaMine (tous les scénarios).....	42
4.2.6 Risques pour les travailleurs lors des opérations de manutention en surface au départ de StocaMine (chargement à StocaMine) et lors du déchargement à l'entrée des sites de Heilbronn, Herfa-Neurode ou Drambon (tous les scénarios sauf le scénario A). .....	43



4.2.7 Risques pour les travailleurs lors du restockage des déchets à Heilbronn, Herfa-Neurode ou à Drambon (tous les scénarios sauf le scénario A) .....	44
4.2.8 Risques lié au transport routier des déchets vers les sites de Heilbronn, Herfa-Neurode et/ou Drambon (travailleurs et populations exposées, biodiversité) (tous les scénarios sauf le scénario A).....	44
<b>5. RÉSULTATS DE LA COMPARAISON - DISCUSSION .....</b>	<b>47</b>
<b>6. SYNTHÈSE.....</b>	<b>51</b>
<b>7. RÉFÉRENCES .....</b>	<b>55</b>

## Figures

Figure 1 - Synthèse du principe de la comparaison des scénarios.....	9
Figure 2 - Principe de l'ACV et indicateurs synthétiques d'impact - Quantis.....	10
Figure 3 – Catégories d'impact ou de dommage et regroupés en 4 grandes catégories de dommages potentiellement pris en compte dans une ACV (tiré de ACV... détail...) .....	11
Figure 4 - Schéma conceptuel du déstockage [58a].....	13
Figure 5 – Schéma conceptuel du stockage illimité et risques vers l'extérieur .....	13
Figure 6 - Schéma conceptuel de fonctionnement du modèle IMPACT 2002+ pour un stockage souterrain de déchets (site de StocaMine ou autres sites souterrains).....	19
Figure 7 - Localisation des sites potentiels.....	24
Figure 8 – Visualisation des étapes nécessaires du déstockage des déchets [54].....	26
Figure 9 - Phases de l'exercice de la réversibilité [34].....	27
Figure 10 - Schéma conceptuel du déstockage et risques associés [58a].....	29
Figure 11 – Représentation des phases successives d'envoyage et d'expulsion de saumure polluée dans l'hypothèse de la mise en place de barrières d'après [58f] et de leur fonctionnement normal, non dégradé.....	35
Figure 12 – Extrait de Stockage souterrain – Informations techniques – K+S <a href="http://www.ks-entsorgung.com/fr/pdf/informations_techniques_utd.pdf">http://www.ks-entsorgung.com/fr/pdf/informations_techniques_utd.pdf</a> .....	40
Figure 13 - Comparaison des scénarios du point de vue de leur impact sur la santé humaine.....	48
Figure 14 - Comparaison des scénarios du point de vue de leur impact sur la biodiversité .....	48

## Tableaux

Tableau 1 - Risques globaux par scénarios et étapes.....	12
Tableau 2 – Type de risques par étapes et par scénario et mode d'estimation .....	17
Tableau 3 - Scénarios examinés.....	33

## Citations

Citation 1 - Extrait d'un rapport de l'OMS ( <a href="http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3fr_3.pdf">http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3fr_3.pdf</a> ) .....	15
Citation 2 - Université de Liège - <a href="http://www.ingveh.ulg.ac.be/fr/cours/Notes_de_cours_MECA_0478/Ecoefficience.pdf">http://www.ingveh.ulg.ac.be/fr/cours/Notes_de_cours_MECA_0478/Ecoefficience.pdf</a> ....	15
Citation 3 - Institut suisse SOFIES - <a href="http://etat.geneve.ch/dt/SilverpeasWebFileServer/Rapport_AMC_Tomate_final.pdf?ComponentId=kmelia187&amp;SourceFile=1286877204429.pdf&amp;MimeType=application/pdf&amp;Directory=Attachment/Images/">http://etat.geneve.ch/dt/SilverpeasWebFileServer/Rapport_AMC_Tomate_final.pdf?ComponentId=kmelia187&amp;SourceFile=1286877204429.pdf&amp;MimeType=application/pdf&amp;Directory=Attachment/Images/</a> .....	16
Citation 4 – « Introduction à l'ACV » -V. Cloup et J. Payet - Maison de l'Ecologie – Lyon - 14 mars 2007.....	18





## **1. CONTEXTE ET OBJECTIF**

StocaMine a exploité le site de stockage souterrain de déchets « ultimes » de Wittelsheim (Haut-Rhin) de 1999 à 2002. Pour cela, un dossier de demande d'autorisation avait été déposé et l'autorisation d'exploiter avait été accordée en 1997 à StocaMine pour une durée de 30 ans.

A cette échéance, deux possibilités étaient prévues :

- le retrait des déchets (exercice de la réversibilité) ;
- le maintien des déchets au fond après confinement (stockage définitif).

L'incendie qui s'est produit en 2002 au sein du stockage a conduit à l'arrêt de son exploitation. Cet événement imprévu a précipité la question du devenir du stockage, les formations salifères au sein desquelles le stockage a été réalisé se refermant lentement mais inexorablement. Ce phénomène naturel vient, en effet, gêner voire empêcher, à moyen terme, un éventuel déstockage. Le décret 2006-283 de mars 2006 a d'ailleurs, dans cette logique, réduit de 30 ans à 1 an la durée au-delà de laquelle l'exploitant est autorisé à déposer une demande de stockage illimité.

Ce décret réclame au sein du dossier que doit produire l'exploitant en accompagnement de sa demande « *Un exposé des solutions alternatives au maintien du stockage avec leurs conséquences respectives et indiquant les motifs pour lesquels le projet présenté a été retenu* » (Art. 2).

StocaMine a confié à l'INERIS la préparation de ce dossier et donc l'examen de cette problématique. Pour y répondre, l'INERIS a proposé d'évaluer plusieurs scénarios relatifs au devenir du stockage en termes de risques ou impacts pour la santé humaine et pour l'environnement, sur la base des informations disponibles.

La méthodologie utilisée a pour vocation d'évaluer de manière homogène et simple la valeur d'indicateurs globaux de risque pour chacun des scénarios examinés. Ces indicateurs ont vocation à intégrer, en particulier, les effets sanitaires et environnementaux des substances potentiellement rejetées dans l'environnement sans faire particulièrement référence à des valeurs seuils réglementaires.

Ces indicateurs permettent, par conséquent, de situer les scénarios les uns par rapport aux autres et de bien identifier celui qui présente les risques cumulés les plus faibles. En effet, les informations disponibles pour chacun des scénarios sont inégales, en quantité et en qualité. Il faut donc considérer que la « *Comparaison des scénarios relatifs au devenir du stockage de StocaMine* » constitue une comparaison d'ordres de grandeur des indicateurs et non celle de valeurs absolues. En effet, un examen approfondi des différents scénarios réclamerait l'acquisition de données complexes, sur des sites sensibles, longues et difficiles à obtenir.

Il est enfin important de retenir que la démarche utilisée ici ne constitue, en aucun cas, une étude de risques. Le scénario retenu, quel qu'il soit, doit ensuite faire l'objet d'une étude de risques détaillée, prenant notamment en compte les aspects réglementaires. Celle-ci permettra, en outre, de rechercher une façon de



minimiser les risques au travers de la mise en place de Moyens de Maîtrise du Risque (MMR).

L'objet de ce rapport est de présenter la méthodologie de comparaison des scénarios, les différents scénarios envisagés, les sites concernés, son application et les résultats obtenus.

Pour ce faire, on trouvera successivement :

- la description de la méthodologie mise en œuvre pour comparer les scénarios et les indicateurs de comparaison ;
- l'exposé de la problématique des différents scénarios envisageables et la description de ceux qui ont été retenus pour cette analyse comparative ;
- la comparaison des scénarios proprement dite avec, successivement, les données d'entrée, les résultats et commentaires.

Le texte qui suit fait appel à des références dont la numérotation, par souci de cohérence et de simplification, est celle du dossier global de demande de prolongation de stockage illimité dont ce rapport constitue l'une des pièces.

Durant la réalisation de cette étude, un certain nombre de présentations a été fait au Comité de pilotage (COPIL) mis en place par l'administration mi-2010 ; l'ensemble des présentations est donné en annexe. Celles qui concernent plus spécifiquement l'analyse et la comparaison des scénarios alternatifs portent les références [58a], [58d], [58e] et [58f] ; certains éléments qui suivent s'y réfèrent. Ces présentations sont également disponibles sur le site internet de StocaMine.

Au-delà de ces présentations, les études se sont poursuivies et ont permis d'affiner certaines valeurs (données d'entrée ou résultats obtenus) et préciser la terminologie. Ces changements, mineurs, ne modifient pas les conclusions de cette étude comparative.

## 2. MÉTHODOLOGIE DE COMPARAISON DES SCÉNARIOS

### 2.1 MÉTHODOLOGIE

*Remarque préliminaire : la comparaison des scénarios de devenir du stockage a fait l'objet de plusieurs présentations au COPIL mis en place par l'administration mi-2010. Les éléments présentés ci-après font donc référence, d'une part aux présentations faites et disponibles en annexe et, d'autre part, à des documents de référence ou normatifs cités.*

La démarche adoptée par l'INERIS a consisté en une analyse des scénarios « extrêmes »<sup>1</sup> (stockage illimité et déstockage total) et de quelques variantes intermédiaires, sur la base de critères ou indicateurs traduisant les risques et impacts génériques de chacun des scénarios. Ces critères n'étant pas « agrégeables » ou additionnables, ils sont représentés par des diagrammes à barres permettant une comparaison facile et objective et la mise en évidence des facteurs prépondérants de l'approche [58a]. La Figure 1 en représente le principe.

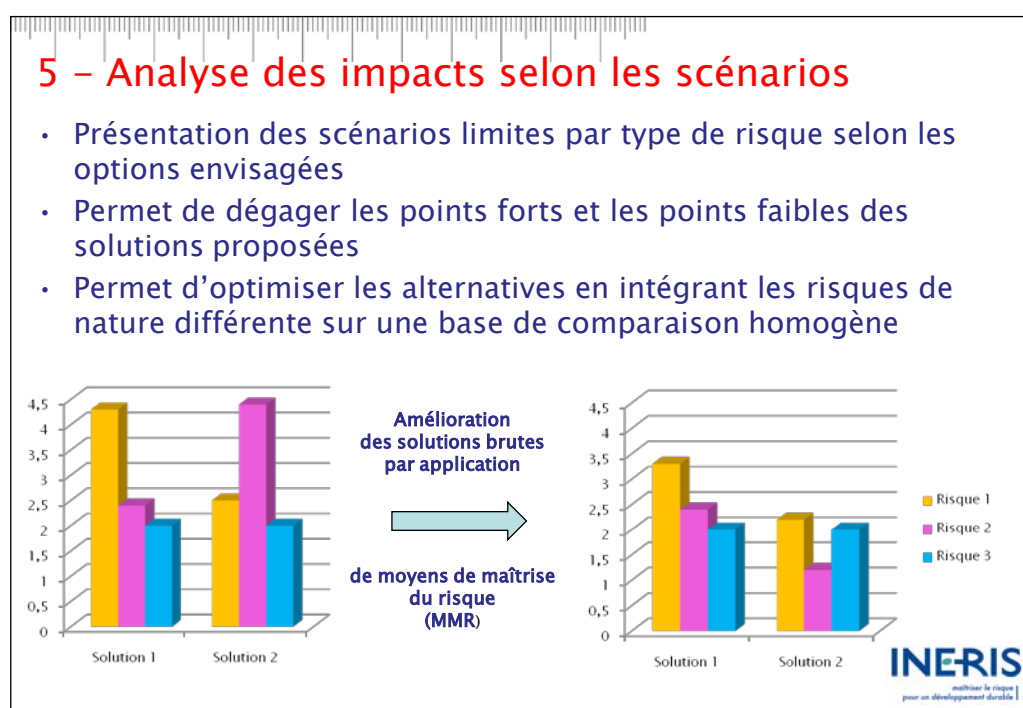


Figure 1 - Synthèse du principe de la comparaison des scénarios

L'objectif de cette comparaison est qu'elle constitue un outil d'aide à la décision aboutissant au choix d'un scénario, le scénario retenu devant être, dans un second temps, examiné de manière détaillée [58c].

<sup>1</sup> Des scénarios de retraitement des déchets n'ont pas été étudiés dans cette comparaison. En effet, aucune méthode techniquement et économiquement viable n'a été identifiée dans la mesure où il conviendrait de traiter à la fois l'ensemble des déchets et tous les polluants qu'ils contiennent.

La méthodologie applique une logique de comparaison des scénarios du point de vue de leurs impacts sanitaires et environnementaux en permettant le rapprochement d'informations de natures différentes :

- risques sanitaires (population générale et travailleurs),
- risques accidentels,
- risques pour l'environnement,

que ces risques soient aigus et chroniques, à court et long termes.

Sur ce dernier point, en effet, on sait que le stockage illimité à StocaMine ou dans un autre site souterrain présente essentiellement des risques à long terme, liés à la migration potentielle de polluants vers la surface. Dans le scénario de déstockage-restockage, les opérations de déstockage présentent des risques à court terme, liés à la manipulation des déchets, essentiellement de nature accidentelle, et le restockage des risques à long terme.

La méthodologie de comparaison s'appuie sur des méthodes d'évaluation du risque existantes et publiées [66] permettant, après recueil et homogénéisation, de traiter des informations et données hétérogènes en qualité et quantité.

La démarche est inspirée de celle de l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) [65], et s'inspire donc des normes NF-EN-ISO-14040 et 14044 d'octobre 2006.

Enfin, la méthodologie de comparaison utilise des indicateurs globaux de risques pour en faciliter la comparaison, comme cela sera détaillé ci-après.

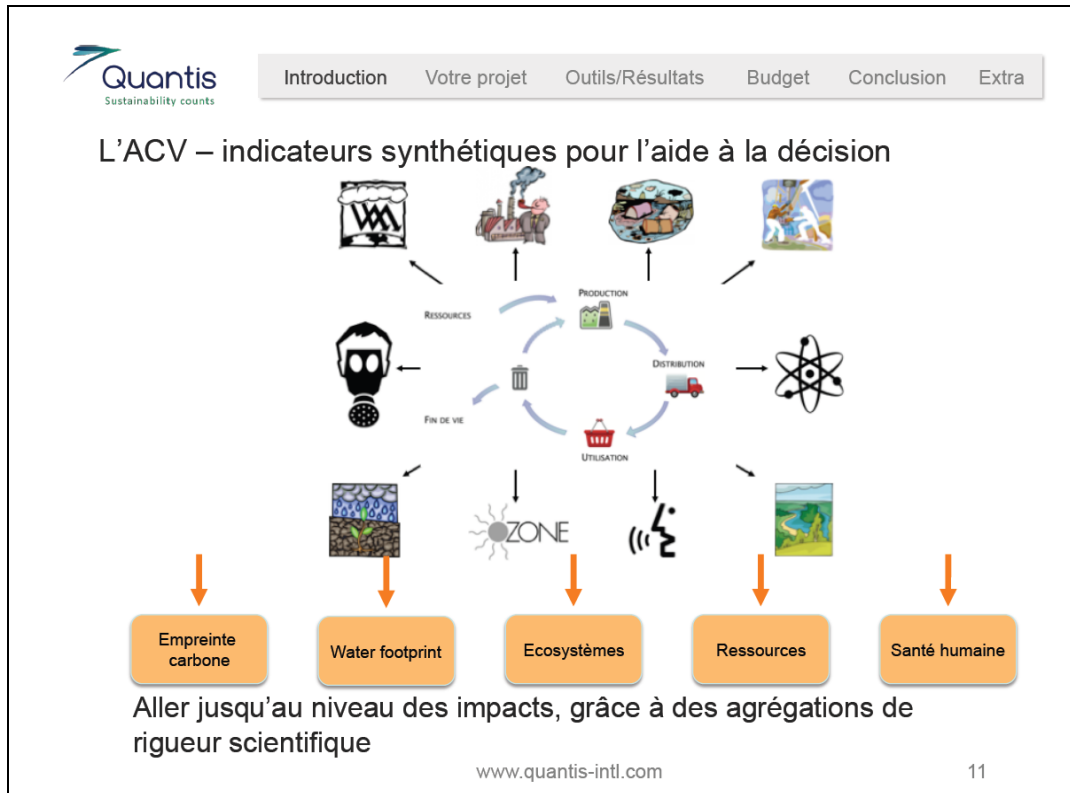


Figure 2 - Principe de l'ACV et indicateurs synthétiques d'impact - Quantis

## 2.2 IMPACTS ET RISQUES PRIS EN COMPTE

Les méthodes citées ci-dessus [65] permettent de prendre en compte et analyser de nombreux types de risques ou impacts. La Figure 3 répertorie les différents types de risques et impacts que ce type de méthode peut traiter.

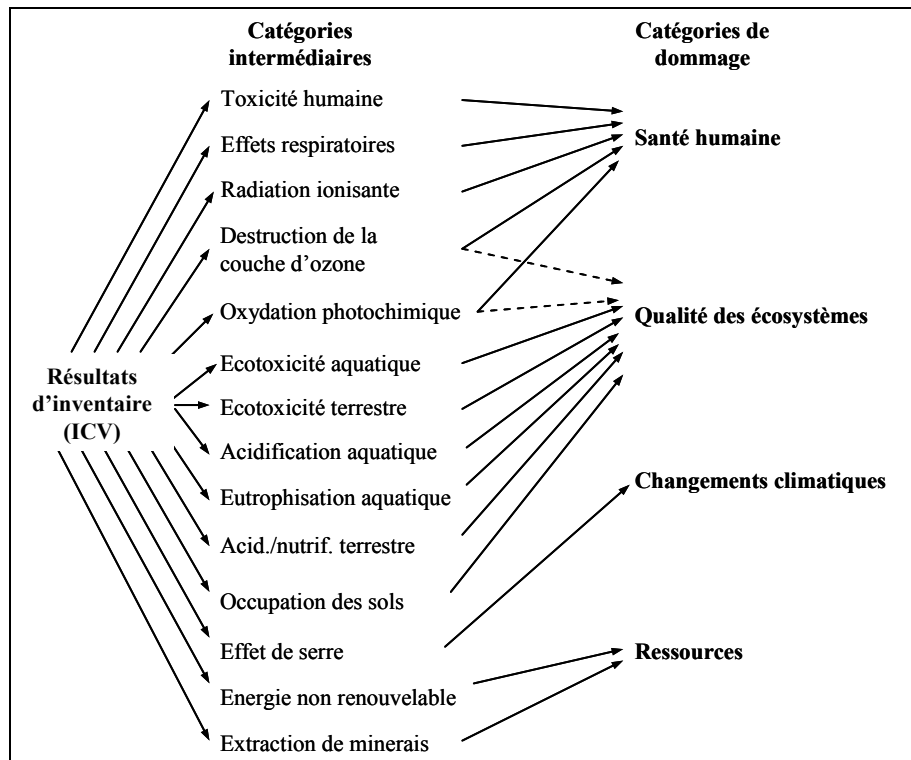


Figure 3 – Catégories d'impact ou de dommage et regroupés en 4 grandes catégories de dommages potentiellement pris en compte dans une ACV (tiré de ACV détail )

D'un point de vue pratique, dans le cas présent, pour permettre la comparaison des scénarios, nous avons retenus les impacts et risques suivants :

- les impacts sanitaires sur les travailleurs et sur la population générale,
- les impacts sur la biodiversité.

Les impacts et risques qui n'ont pas été pris en compte sont :

- les impacts sur le changement climatique ; c'est principalement le transport qui contribue à cet impact, au travers de l'émission de gaz à effet de serre ;
- les impacts sur la qualité de l'air ; comme le précédent, c'est le transport qui contribue à cet impact ;
- les impacts sur les ressources naturelles ; le transport classique (consommation d'énergie non renouvelable) contribue à cet impact ;
- les enjeux juridiques, financiers et sociopolitiques.



Pour chacun des scénarios extrêmes retenus et pour chacune des grandes étapes de ces scénarios (indiquées dans le Tableau 1 ci-après), le travail a consisté à calculer la contribution aux indicateurs de chacun des risques et impacts « individuels ».

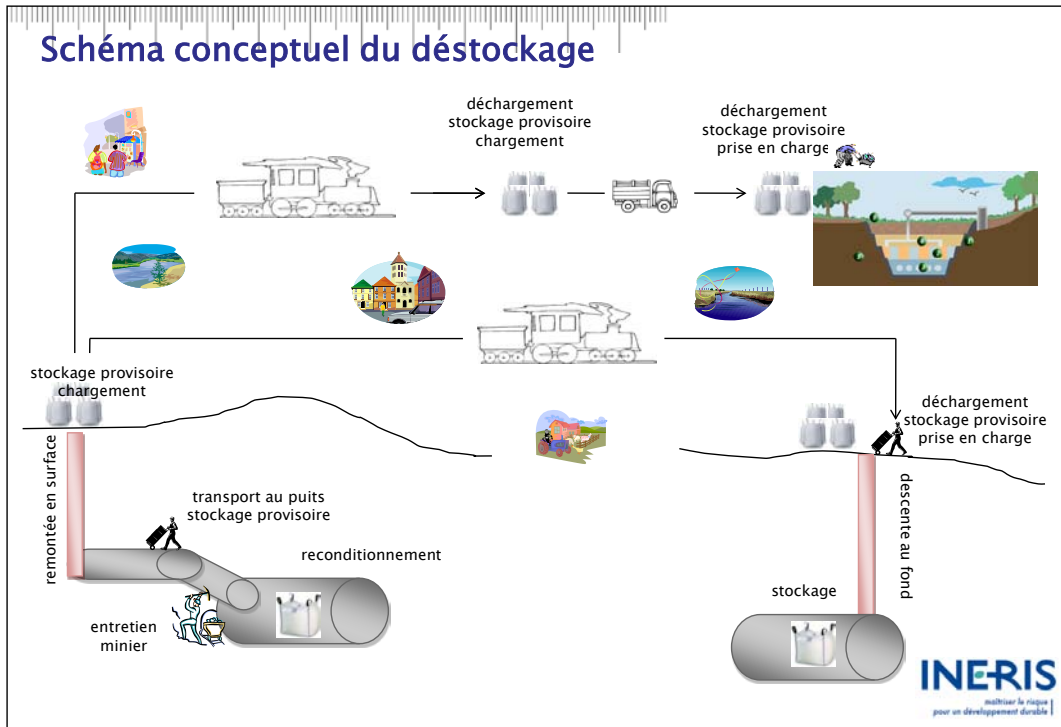
Temporalité			
Court terme	Interventions de stabilisation dans la mine	Interventions de stabilisation dans la mine	• Risque sanitaire par exposition des travailleurs sur site (risque physico-chimique). Concentration résiduelle ou émanation accidentelle
			• Risque de dommages corporels accidentels sur travailleurs (risque mécanique)
			• Risque minier spécifique
		Déstockage	• Risque de pollution accidentelle en raison des activités dans la mine (air extérieur)
			• Risques physico-chimique, mécanique et minier
		Transport	• Risque de pollution accidentelle (air, cours d'eau, sol, nappe)
			• Risque d'exposition de personnes directement impliquées (physico-chimique)
			• Risque de dommages corporels accidentels sur personnes impliquées (mécanique)
	Restockage	• Risque de pollution accidentelle en raison des activités dans le stockage souterrain allemand (air extérieur)	
		• Risque de pollution accidentelle en raison des activités dans le stockage de surface	
		• Risques physico-chimique, mécanique, minier dans le site allemand • Risques physico-chimique, mécanique sur le site de surface	
Long terme	Gestion du site (surveillance, entretien pompes, suivi nappe...)	Gestion du site (surveillance, entretien pompes, suivi nappe...)	(négligé – identique dans les 2 scénarios)
	Fuite chronique	Fuite chronique	• Remobilisation de polluants vers la nappe à travers une faille, puis vers les eaux de surface (augmentation du bruit de fond de la contamination environnementale) • Remobilisation de polluants vers la nappe – contact direct par eau consommée ou irrigation • Diffusion de polluants vers l'air extérieur, e.g. via une faille
	Evènement catastrophique	Evènement catastrophique	• Résurgence soudaine de polluants en surface (air, eau) e.g. séisme

Tableau 1 - Risques globaux par scénarios et étapes

### 2.3 PÉRIMÈTRE DE L'ÉTUDE

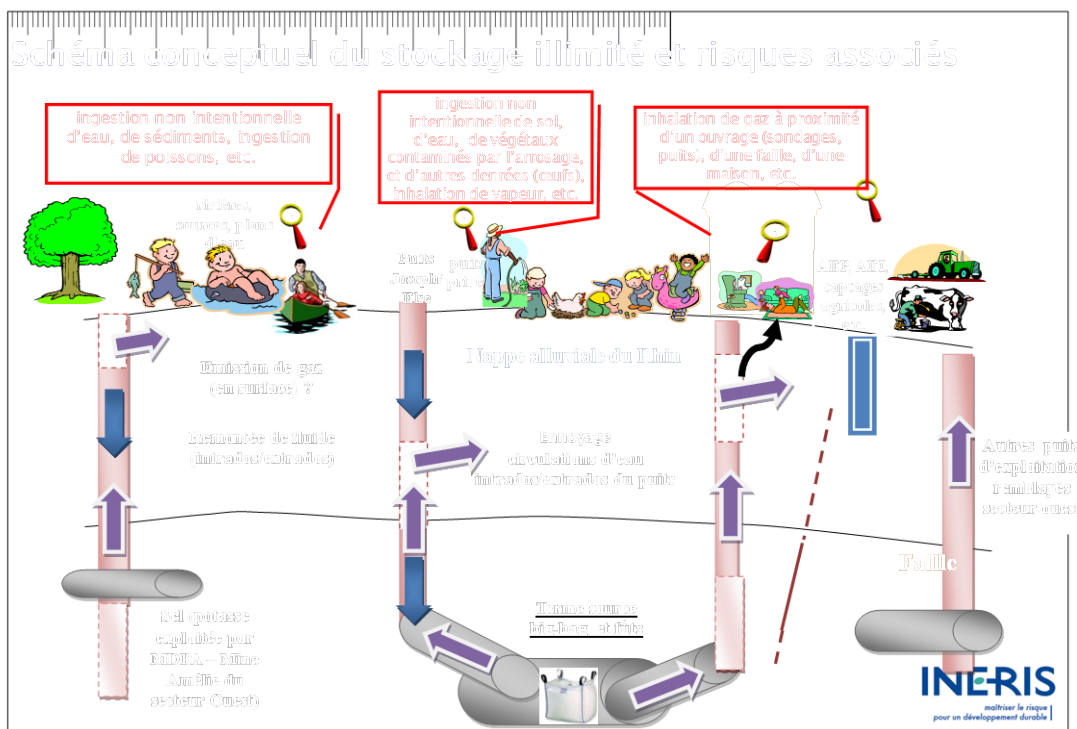
Le périmètre de l'étude de comparaison est représenté sur le schéma conceptuel de la Figure 4 pour ce qui concerne les scénarios de déstockage.

Pour les scénarios de stockage illimité, la Figure 5 [58a] synthétise le périmètre « extérieur » d'un stockage ou restockage illimité, quel que soit le site retenu, auquel il faut ajouter tous les travaux nécessaires à la fermeture-même du (des) site(s).



19 nov. 2010- 9 / 24

Figure 4 - Schéma conceptuel du déstockage [58a]



16 nov. 2010-11 / 24

Figure 5 – Schéma conceptuel du stockage illimité et risques vers l'extérieur

## 2.4 INDICATEURS GLOBAUX ET MODE D'OBTENTION

Les paragraphes précédents mettent bien en évidence la diversité et l'hétérogénéité des données tant en nature qu'en qualité ou quantité. L'agrégation de tels paramètres hétérogènes est difficile. Elle est toutefois rendue possible par l'utilisation des indicateurs suivants.

### 2.4.1 Impacts sur la santé humaine

Il est possible de traduire les impacts sur la santé humaine, qu'ils soient létaux, aigus ou chroniques, à court ou long terme, qu'ils concernent les travailleurs intervenant sur les sites de stockage et/ou les déchets ou encore la population générale, sous forme d'un indicateur commun et donc d'additionner les contributions partielles de chaque étape de scénario.

L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) a adopté pour ce type de problématique une grandeur dénommée DALY (Disabled-Adjusted-Life-Year). Cet indicateur se traduit par « Année de vie corrigée de l'incapacité » (on trouve aussi « années de vie ajustées aux handicaps ») dont une explication est donnée dans l'extrait ci-dessous (Citation 1). Cet indicateur cumule les décès et incapacité, temporaire ou permanente, que l'origine en soit accidentelle ou non.

*Pour comparer objectivement les dangers liés à l'eau et les différents résultats sanitaires qui peuvent en découler, il faut disposer d'une « aune » commune, pouvant prendre en compte les différences de probabilité, de gravité et de durée des effets. Cette mesure devrait être applicable à tout type de danger, qu'il soit d'ordre microbiologique, chimique ou radiologique. La mesure utilisée dans les Directives de qualité pour l'eau de boisson est l'année de vie corrigée de l'incapacité (DALY). L'OMS a déjà largement fait appel à la DALY pour évaluer les priorités en santé publique et la charge de morbidité associée à des expositions environnementales.*

*Le principe de base de la DALY est de pondérer chaque effet sanitaire en fonction de sa gravité par un coefficient allant de 0 (bon état de santé normal) à 1 (décès). Ce coefficient de pondération est multiplié par la durée de l'effet - à savoir le temps pendant lequel la maladie se manifeste (lorsque le résultat sanitaire est la mort du sujet, la « durée » est définie comme l'espérance de vie restante) - et par le nombre de personnes concernées par un résultat particulier. Il est ensuite possible d'additionner les effets de l'ensemble des divers résultats sanitaires provoqués par un agent donné.*

*Ainsi, la DALY représente la somme des années de vie en bonne santé perdues du fait d'un décès prématuré (YLL) et des années de vie en bonne santé perdues contre des années de vie dans un état de santé détérioré, c'est-à-dire des années vécues en incapacité (YLD), normalisées par des coefficients de gravité.*

*On obtient donc la formule :*

$$DALY = YLL + YLD$$

*L'emploi des DALY a comme principal avantage de permettre l'« agrégation » des différents effets et la combinaison des notions de qualité et de quantité relatives à la vie. De plus, les approches adoptées imposant de reconnaître explicitement les hypothèses utilisées, il est possible de discuter celles-ci et d'évaluer l'incidence de leur variation. L'utilisation d'une mesure des effets sanitaires concentre l'attention sur les dangers réels plutôt que sur les dangers potentiels. Elle favorise et permet ainsi une définition rationnelle des priorités de santé publique. La plupart des difficultés rencontrées dans l'utilisation des DALY sont liées à la disponibilité des données (concernant l'exposition et les associations épidémiologiques, par exemple).*

*Citation 1 - Extrait d'un rapport de l'OMS  
([http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/dwq/gdwq3fr\\_3.pdf](http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3fr_3.pdf))*

Cette grandeur est aujourd'hui utilisée pour aborder différentes comparaisons de « maladies ou traumatismes » (comparaison de la charge annuelle totale en termes de mortalité, de morbidité et d'incapacité des maladies liées à l'environnement <http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2006/pr32/fr/>) comme pour quantifier l'effet d'une substance ou d'un produit sur la santé (arsenic, benzène, plomb... [http://www.who.int/ipcs/features/10chemicals\\_fr.pdf](http://www.who.int/ipcs/features/10chemicals_fr.pdf)).

Pour illustrer la valeur de cette grandeur, une valeur de 100 DALY traduit la perte de 100 années de vie en bonne santé.

L'utilisation de cet indicateur dans le domaine de la santé humaine (maladie, effet des substances) est consensuelle.

#### **2.4.2 Impacts sur la qualité des écosystèmes**

Outre les impacts sur la santé humaine, les scénarios envisagés présentent des impacts sur la qualité des écosystèmes. Là aussi, ces impacts proviennent de différents paramètres et ont des effets complexes à comparer.

Pour ce type d'effet, une grandeur générique a été utilisée : le PDF.m<sup>2</sup>.an (Potentially Disappeared Fraction qui se traduit par « fraction d'espèces affectée et/ou disparue »). Elle traduit le nombre d'espèces potentiellement disparue sur une surface de 1 m<sup>2</sup> pendant 1 an. Les deux citations suivantes illustrent d'autres formulations de cette grandeur.

*[PDF.m<sup>2</sup>.an]: (Potentially Disappeared Fraction ou Fraction Potentiellement disparue d'espèces) pour les dommages aux écosystèmes, la superficie annuelle des zones où les espèces ont une grande probabilité de ne pas apparaître en raison des conditions défavorables causées par les dépôts de polluants*

*Citation 2 - Université de Liège -  
[http://www.ingveh.ulg.ac.be/fr/cours/Notes\\_de\\_cours\\_MECA\\_0478/Ecoefficiency.pdf](http://www.ingveh.ulg.ac.be/fr/cours/Notes_de_cours_MECA_0478/Ecoefficiency.pdf)*



*Les impacts sur l'écosystème terrestre et aquatique, ainsi que la toxicité des produits chimiques pour les espèces sont pris en compte, en impliquant les dommages liés à sa pollution et sa disparition due à l'emprise au sol de l'activité évaluée. Le résultat de l'écobilan donne cette valeur en PDF.m<sup>2</sup>.an (PDF : Potentially Disappeared Fraction) qui quantifie la disparition potentielle d'espèces par mètre carré par année.*

*Citation 3 - Institut suisse SOFIES -*

*[http://etat.geneve.ch/dt/SilverpeasWebFileServer/Rapport\\_AMC\\_Tomate\\_final.pdf?ComponentId=kmelia187&SourceFile=1286877204429.pdf&MimeType=application/pdf&Directory=Attachment/Images/](http://etat.geneve.ch/dt/SilverpeasWebFileServer/Rapport_AMC_Tomate_final.pdf?ComponentId=kmelia187&SourceFile=1286877204429.pdf&MimeType=application/pdf&Directory=Attachment/Images/)*

Ainsi, une valeur de 1000 PDF.m<sup>2</sup>.an peut correspondre à la disparition potentielle ou l'affection de 1000 espèces sur 1 m<sup>2</sup> pendant 1 an ou à celle d'1 espèce sur 1000 m<sup>2</sup> pendant 1 an comme à celle d'1 espèce sur 1 m<sup>2</sup> pendant 1000 ans.

### **2.4.3 Calcul des indicateurs**

Le calcul de ces indicateurs globaux pour chacun des scénarios examinés passe par :

- une phase d'inventaire de toutes les étapes du scénario considéré, comme peut le traduire le Tableau 1 ;
- pour chacune de ces étapes, une identification (Tableau 1 également) et une quantification des impacts potentiels ;
- et, pour chacun de ces impacts, l'évaluation de la (ou des) valeur(s) des parts des indicateurs qui en découlent. A noter que certains impacts peuvent se traduire au travers des deux indicateurs simultanément ; par exemple, une substance peut, à la fois, être toxique pour l'homme et donc contribuer à l'indicateur en DALY et présenter un impact sur la biodiversité et alors contribuer à l'indicateur en PDF.m<sup>2</sup>.an.

Ces indicateurs ont été évalués par deux approches selon la nature et le type des données :

- soit sur la base de statistiques d'accidentologie et de durées d'exposition ;
- soit par une modélisation globale des effets des substances en utilisant un modèle intégrateur dit « de compartiment » (aquatique et terrestre) à l'échelle spatiale européenne et sans limitation de temps.

Le modèle utilisé pour la seconde approche est le modèle IMPACT 2002+ [66] décrit ci-après.

Le Tableau 2 [58c] détaille le mode d'évaluation par étape et scénario.

## Types de risques par étape pour les deux scénarios et mode d'estimation

Temporalité	Stockage illimité	Déstockage-restockage	Types de risque ou impact
Court terme	Interventions de stabilisation dans la mine	Interventions de stabilisation dans la mine	• Risque sanitaire par exposition des travailleurs sur site (risque physico-chimique). Concentration résiduelle ou émanation accidentelle
			• Risque de dommages corporels accidentels sur travailleurs (risque mécanique)
			• Risque minier spécifique
		Déstockage	• Risque de pollution accidentelle en raison des activités dans la mine (air extérieur)
			• Risques physico-chimique, mécanique et minier
		Transport	• Risque de pollution accidentelle (air, cours d'eau, sol, nappe)
			• Risque d'exposition de personnes directement impliquées (physico-chimique)
			• Risque de dommages corporels accidentels sur personnes impliquées (mécanique)
			• Risque de pollution accidentelle en raison des activités dans le stockage souterrain allemand (air extérieur)
		Restockage	• Risque de pollution accidentelle en raison des activités dans le stockage de surface
• Risques physico-chimique, mécanique, minier dans le site allemand			
• Risques physico-chimique, mécanique sur le site de surface			
Long terme	Gestion du site	Gestion du site	(négligé – identique dans les 2 scénarios)
	Fuite chronique	Fuite chronique	• Remobilisation de polluants vers la nappe à travers une faille, puis vers les eaux de surface (augmentation du bruit de fond de la contamination environnementale)
			• Remobilisation de polluants vers la nappe – contact direct par eau consommée ou irrigation
			• Diffusion de polluants vers l'air extérieur, e.g. via une faille
Evénement catastrophique	Evénement catastrophique	• Résurgence soudaine de polluants en surface (air, eau) e.g. séisme	

Estimation du risque basée sur des statistiques d'accidentologie et durée d'exposition

Estimation du risque par modélisation globale des effets des substances (IMPACT 2002)



Tableau 2 – Type de risques par étapes et par scénario et mode d'estimation

Pour certaines étapes de scénario (en jaune sur le tableau), l'évaluation de l'impact sur la santé humaine s'est appuyée sur des données de statistiques d'accidentologie, que ce soit au travail ou durant le transport des déchets. Le détail en est donné au chapitre sur la comparaison des scénarios. La traduction en DALY s'est faite sur la base de données OMS (<http://apps.who.int/ghodata/>).

Pour les autres étapes de scénario (en bleu sur le tableau), conduisant à des impacts diffus dans l'air, l'eau (souterraine ou de surface) ou les sols, sur la santé humaine ou l'environnement, l'évaluation est fondée sur l'utilisation du modèle IMPACT 2002+. Celui-ci a recours, comme donnée d'entrée, à des masses (cumulées dans le temps) des substances rejetées dans l'environnement. Celles-ci ont été obtenues à partir d'études, notamment l'étude du terme source et son impact sur la nappe, l'air et le sol [56].

Le modèle IMPACT 2002+ applique ensuite à ces masses de substances ses propres facteurs de caractérisation, spécifiques de chaque substance, qui intègrent le devenir de la substance dans les différents compartiments de l'environnement, les modes d'exposition des individus, le potentiel de risque et la gravité des effets sur la santé humaine. Le modèle fournit ainsi des résultats directement exprimés en DALY et en PDF.m<sup>2</sup>.an.

La Citation 4 détaille l'approche décrite ci-dessus pour la toxicité humaine (<http://www.vertsmairielyon.org/pagestemporaire/2007-Mai-ACV.pdf>)

## Description de l'indicateur d'impact sur la santé humaine (DALY : Disability Adjusted Life Year)

### Toxicité humaine

Les facteurs de dommages sur la santé humaine sont déterminés à partir du modèle IMPACT 2002+ qui procure des facteurs de caractérisation par défaut (risques et impacts potentiels par unité de masse émise) pour 1000 substances chimiques.

Les facteurs de caractérisation tiennent compte :

- Du **devenir de la substance**, qui inclut son transport dans l'espace entre les différents milieux
- De l'**exposition humaine** associée à la production de nourriture, à l'approvisionnement en eau et à l'inhalation
- Du **potentiel de risque** sur la santé humaine pour les affections cancérigènes ou non cancérigènes, c'est-à-dire le nombre de cas probables (mortalité, maladie) par kg de substance ingérée dans la population. Cette grandeur se base soit sur des études épidémiologiques, ou plus souvent sur des essais chroniques effectués sur des rongeurs. IMPACT 2002+ détermine les valeurs les plus probables, contrairement aux grandeurs utilisées en évaluation des risques qui font intervenir des coefficients de sécurité afin de ne pas dépasser certains niveaux de risque.
- De la **gravité** de ces maladies, c'est-à-dire la sévérité de l'effet (maladie, mortalité) sur la santé humaine. Le facteur de gravité est exprimé en année équivalente de vie perdue par cas de maladie (DALY/cas) tels qu'utilisés par l'Organisation Mondiale de la Santé.

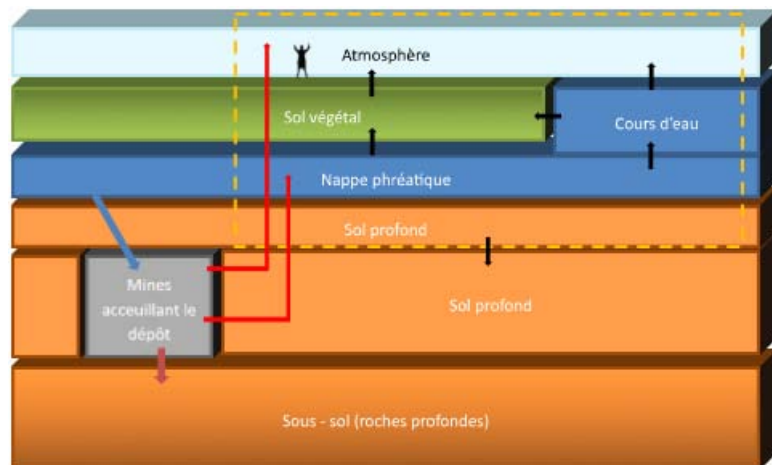
Facteur de devenir x Facteur d'exposition = Fraction ingérée (en kg ingéré/ kg émis)

Potentiel de risque x Gravité = Facteur d'effet (DALY/kg ingéré)

Les **facteurs de caractérisation** des dommages permettent ensuite de passer des kg de substance équivalente aux années équivalentes de vie perdues (DALY), unité d'expression des dommages sur la santé humaine.

*Citation 4 – « Introduction à l'ACV » -V. Cloup et J. Payet - Maison de l'Ecologie – Lyon - 14 mars 2007*

Le schéma conceptuel de la Figure 6 illustre le fonctionnement du modèle IMPACT 2002+ en fonction des données fournies en entrée (flèche rouge) vers la nappe ou l'atmosphère. L'étendue spatiale sur laquelle la modélisation porte, représentée schématiquement par le tireté jaune sur la figure, recouvre l'ensemble du territoire sur lequel les substances rejetées dans l'environnement peuvent présenter un impact compte tenu des vecteurs concourant à leur dissémination. Le territoire considéré est a priori illimité, dépassant les échelles locale et régionale.



*Figure 6 - Schéma conceptuel de fonctionnement du modèle IMPACT 2002+ pour un stockage souterrain de déchets (site de StocaMine ou autres sites souterrains)*

En fin de compte, cette démarche permet d'aboutir à des valeurs des deux indicateurs précédents qu'il convient de considérer comme des ordres de grandeurs, suffisants pour permettre une comparaison des scénarios entre eux.





### **3. PROBLÉMATIQUE ET SCÉNARIOS**

#### **3.1 DESCRIPTION DU SCÉNARIO DE DÉSTOCKAGE OU RÉVERSIBILITÉ**

Le scénario de réversibilité a fait l'objet de plusieurs études par des bureaux d'études français ou étrangers, complétées par des approches spécifiques sur le transport des déchets, les sites pouvant les accueillir, les problèmes spécifiques du bloc 15 et des risques miniers. Les principales dispositions sont décrites ci-dessous avec des renvois aux références détaillées de la bibliographie.

Le déstockage total des déchets constitue un scénario extrême en alternative au maintien du stockage. Il a fait l'objet d'études par des bureaux missionnés par StocaMine entre 2004 et 2006 ; on retiendra principalement les références suivantes :

- [31] *Etude d'impact, rapport de synthèse, Institut Suisse pour la Promotion de la Sécurité, juillet 2004.*
- [37] *Etude de sécurité au travail et de protection de la santé dans le cadre de la mise en œuvre de la réversibilité, Institut Suisse de Promotion de la Sécurité, juin 2006.*
- [38] *Rapport de synthèse Etude approfondie de la variante de la mise en œuvre de la réversibilité, Institut Suisse de Promotion de la Sécurité, juin 2006.*
- [39] *Stockage souterrain de Wittelsheim : évaluation technique de la variante de la mise en œuvre de la réversibilité, BMG Engineering AG, juin 2006.*

Ces études ont pris en compte la majeure partie des éléments d'analyse relatifs au site de StocaMine, hormis le risque spécifique du contexte minier qui n'a pas été abordé. De plus, elles se sont limitées au périmètre-même du stockage existant, sans prendre en compte le déplacement des déchets, ni leur restockage dans les sites pouvant les recevoir. Enfin, ces études ont toutes pris comme hypothèse que les déchets du bloc 15 ne seraient pas déstockés pour les raisons indiquées ci-après.

Les données utilisées pour analyser le scénario de déstockage sont issues des études citées ci-dessus ; toutefois, pour que l'analyse comparative soit aussi exhaustive que possible, l'INERIS a intégré au scénario consistant à déstocker l'ensemble des déchets :

- les interventions dans la mine nécessaires au déstockage, y compris celles relevant de la sécurisation préalable de l'ouvrage minier ;
- la remontée des déchets dans le puits, y compris le stockage temporaire en fond de mine et au jour ;
- le transport des déchets vers des sites autorisés en fonction de leurs classements respectifs ;
- s'agissant de déchets ultimes, leur restockage sur les sites autorisés, y compris traitement ou conditionnement spécifique.

Une synthèse de la problématique du déstockage a été présentée au COPIL le 20 janvier 2011 ; la référence [58c] correspond à cette synthèse et a été complétée par la présentation de la problématique spécifique du bloc 15 le 28 février 2011 [58d]. Le rapport du COPIL [59] s'en fait largement l'écho et précise la position de ses experts sur ce sujet.

### 3.1.1 Déstockage des déchets

Les déchets en place au moment de la réalisation du dossier de demande de prolongation du stockage sont considérés comme ultimes, ce qui signifie qu'il n'y a pas de possibilité de retraitement dans des conditions technico-économiques acceptables et qu'ils devraient, par conséquent, être envoyés vers d'autres sites de stockage. Ces déchets sont répartis en deux grandes classes :

- 23 000 t de déchets (déchets amiantés et résidus d'incinération), représentant 27 000 colis, devraient être dirigés vers des installations de stockage de déchets dangereux (14 sites en France) ;
- 19 000 t de déchets (pour les autres catégories de déchets), représentant 37 200 colis, devraient obligatoirement être dirigés vers des installations de stockage de déchets ultimes, c'est-à-dire dans un stockage souterrain du même type que celui de StocaMine. Comme il n'existe pas de tel centre de stockage en dehors de celui de StocaMine en France, les déchets devraient être transportés vers les centres autorisés les plus proches, soit en Allemagne (14 sites également).

Pour compléter ces deux grandes classes, il faut ajouter les déchets du bloc 15. En effet, leurs qualité et masse (1 775 t) étaient connues à l'entrée mais ils ont évolué lors de l'incendie de 2002 par perte de masse et apparition de déchets connexes, entre autres des particules de dioxines et furanes.

La visite des zones accessibles du bloc 15 et l'examen de blocs situés dans les conditions similaires de creusement (blocs 16 et 25 notamment) ont mis en évidence les dangers importants auxquels le personnel chargé du déstockage et de la mise en sécurité préalable serait exposé. Ces différents points ont été abordés lors des visites et exposés aux experts du COPIL [58c] et [58d] qui ont, à la quasi-unanimité, rejoint les avis précédents et conclu sur l'impossibilité de déstocker le bloc 15 ([59], p.11 - Conclusions et recommandations - Difficultés possibles du retrait).

Pour ces raisons, l'INERIS a étudié deux variantes du scénario de déstockage des déchets :

- le déstockage hors bloc 15
- et, pour le principe, le déstockage total, bloc 15 compris, cette variante étant, en effet, jugée peu réaliste par les experts. Par ailleurs, les travaux de mise en sécurité qui s'imposeraient conduiraient à faire tomber la première couche de sel au toit des galeries sur une épaisseur de 2 m, là où celui-ci ne l'est pas déjà. Il faudrait donc prendre en compte une masse supplémentaire (d'environ 30 000 t) de sel souillé par contact avec les déchets, les fumées ou les poussières [58c] [58d], ce qui n'a pas été fait.

### 3.1.2 Les sites de destination

Le site du ministère chargé de l'écologie<sup>2</sup> recense, à la date d'interrogation, 14 sites en France pouvant accueillir les 23 000 t de déchets dangereux (anciennement appelés « déchets de classe 1 ») de StocaMine. Sur ces 14 sites, les 3 plus proches ont été retenus pour analyser plus en détail leur pertinence ; il s'agit des sites de stockage de Vaivre-Pusey (Haute-Saône), Drambon (Côte d'Or) et Jeandelaincourt (Meurthe et Moselle). A noter qu'il n'existe pas d'installation de stockage de déchets de dangereux en Alsace.

De même, 14 sites de stockage de déchets ultimes (anciennement appelés « déchets de classe 0») ont été recensés en Allemagne [49]. Tous ne peuvent recevoir les déchets de StocaMine classés ultimes et seuls 3 ont pu être analysés et comparés au site de Wittelsheim sur les plans géologique et hydrogéologique [49]. Dans les deux cas, ces sites disposent de l'espace nécessaire à la réception de tout ou partie des déchets qui leur sont destinés, les sites français pouvant accueillir les 23 000 t de déchets dangereux et les sites allemands pouvant accueillir la totalité des déchets ultimes et dangereux. Enfin, les sites de stockage en mine de sel allemande pour lesquels la comparaison a pu être faite ne semblent pas présenter un contexte géologique plus favorable que celui du site de Wittelsheim [49] et [59].

La faisabilité du transport du site de Wittelsheim vers les différents sites de restockage a été analysée par l'INERIS [54]. Il en ressort que, si le choix se porte vers les sites autorisés les plus proches du point de stockage actuel<sup>3</sup> (ordonnance n° 2010-1579 du 17 décembre 2010), ce sont les sites de Vaivre-Pusey pour les déchets dangereux et de Heilbronn pour les déchets ultimes qui seraient retenus dans cette logique.

Pour les déchets dangereux, l'exploitant du site de Vaivre-Pusey a signalé que le maintien de ce site dans le temps ne serait pas nécessairement assuré ; pour la comparaison des scénarios, le choix s'est donc porté vers celui de Drambon, le plus proche après celui de Vaivre-Pusey et disposant de toutes les autorisations pour recevoir les déchets. Pour s'assurer que les déchets issus du site de stockage de StocaMine seraient autorisés sur le site de Drambon, plusieurs compositions chimiques types ont été transmises à l'exploitant. Celui-ci a vérifié que les mesures de traitement en service sur le site avaient les performances nécessaires pour inérer ces déchets. Si cette solution était choisie, cette vérification devrait se faire conformément aux dispositions légales en cours au moment du transfert (certificat d'acceptation préalable).

---

<sup>2</sup> ([http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/ecologie/pdf/Liste\\_CSDD\\_200702.pdf](http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/ecologie/pdf/Liste_CSDD_200702.pdf))

<sup>3</sup> Ordonnance n° 2010-1579 du 17 décembre 2010 portant diverses dispositions d'adaptation au droit de l'Union européenne dans le domaine des déchets. L'article 2 de l'ordonnance modifie l'article. L. 541-1 du code de l'environnement comme suit, en mentionnant au 4° la nécessité « d'organiser le transport des déchets et de le limiter en distance et en volume ».



Les déchets ultimes peuvent être accueillis (autorisation et disponibilité) dans le site souterrain allemand de Heilbronn, le plus proche de Wittelsheim. C'est donc naturellement que ce site a été retenu pour la comparaison des scénarios de devenir du stockage. A la demande du COFIL le 1<sup>er</sup> avril 2011, le site souterrain allemand de Herfa-Neurode, disposant également de l'autorisation et de la disponibilité pour recevoir les déchets de StocaMine, a également été intégré à la comparaison ; il faut toutefois noter qu'il se situe à une distance deux fois plus importante que le site de Heilbronn, ce qui n'est pas dans l'esprit de l'ordonnance n° 2010-1579 du 17 décembre 2010.

La Figure 7 présente une carte sur laquelle figure les sites indiqués précédemment.

En résumé, les sites de stockage retenus pour l'analyse et la comparaison des scénarios de devenir du stockage de Wittelsheim sont Drambron (Côte d'Or) pour les déchets dangereux et Heilbronn et Herfa-Neurode (Allemagne) pour les déchets ultimes ou la totalité des déchets.

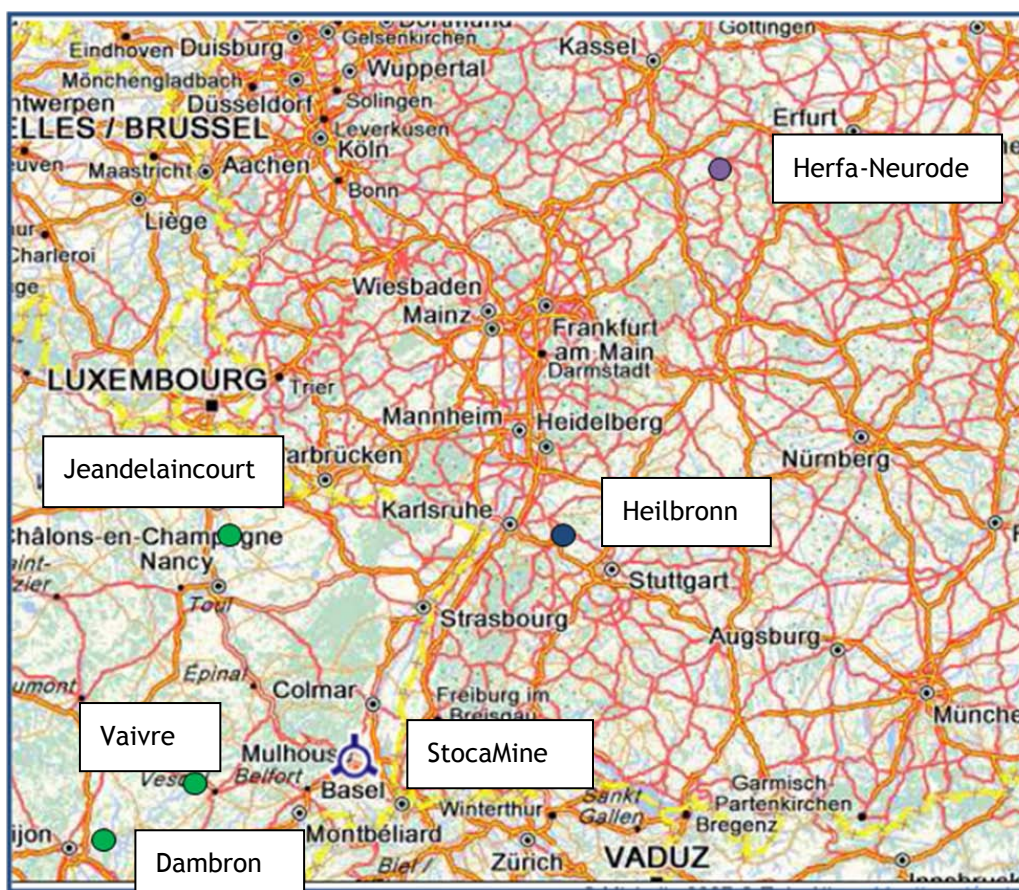


Figure 7 - Localisation des sites potentiels

### 3.1.3 Choix du mode de transport

Pour le déplacement des déchets en surface vers les sites de destination, les modes routier, ferroviaire, fluvial et multimodaux ont été envisagés. Le transport par route présente les avantages suivants :

- tout d'abord, il assure une fluidité entre la remontée des déchets du fond par les puits, le chargement et le transport des déchets vers les sites de destination qui seraient retenus ; on évite ainsi les stockages tampons entre remontée et départ des déchets ainsi qu'entre arrivée et déchargement sur le site de restockage, et les risques correspondants ;
- le transport routier permet d'éviter les agglomérations fortement urbanisées tandis que le train les traverse généralement. L'accidentologie ferroviaire est statistiquement plus faible mais ce mode de transport mobilise une masse de déchets plus importante, ce qui le pénalise ;
- enfin, seul le transport des déchets en train complet assure la maîtrise la plus sûre du tracé emprunté ; tous les autres cas ne peuvent garantir le tracé emprunté pour des raisons de regroupement sur des plates-formes ; compte tenu de ces inconnues, l'évaluation du risque présente un fort degré d'incertitude.

A noter que, par souci d'exhaustivité, le mode multimodal a été examiné (fluvial-route et fluvial-ferroviaire) mais abandonné pour des contraintes administratives (autorisations, stockage intermédiaire avec servitudes, formation spécifique des navigateurs) [54].

En résumé sur ce point, le transport par route apparaît comme globalement le moins pénalisant en termes de risques et impacts et, in fine, c'est celui qui a été retenu.

### 3.1.4 Faisabilité technique de la réversibilité et sécurité du personnel

Les déchets ayant déjà été conditionnés avant leur stockage (inertage et emballage), un réemballage systématique ne serait, en principe, pas nécessaire en cas de déstockage. Toutefois, pour éviter tout danger lié à un choix inapproprié et dans l'hypothèse où les sites d'accueil l'exigeraient, un réemballage systématique a été retenu comme étant une opération nécessaire.

Le déroulement technique du déstockage serait le suivant (voir Figure 8) :

- Travaux préparatoires : préparation/sécurisation des accès miniers : mise à section des galeries de transport par arasement des murs ayant évolué du fait de la convergence des terrains (soufflage) et mise en sécurité des parements et du toit (boulonnage...) ;
- Déstockage et réemballage des déchets qui comprend :
  - l'installation d'un système d'aéragage supplémentaire dans la ou les zones à déstocker pour traiter l'air pouvant contenir des polluants ;
  - l'identification et la reprise des colis ;
  - le réemballage des colis nécessaires avec des « sur-bigbags » ou le dépoussiérage des colis non réemballés (aspirateur équipé de filtres) ;
- Transport souterrain jusqu'au puits Joseph, stockage intermédiaire (capacité 100 colis, soit maximum 48 h) ;
- Remontée des déchets ;
- Stockage intermédiaire au jour (capacité 120 colis) et étiquetage ;

- Transport et élimination des déchets vers les sites autorisés.

Ce dernier point n'était pas pris en compte dans les études 2004-2006 et a donc nécessité des études et recueils d'informations complémentaires [54].

Déstockage des déchets : Répartition du périmètre d'étude pour l'évaluation de l'impact environnemental et de l'impact sanitaire

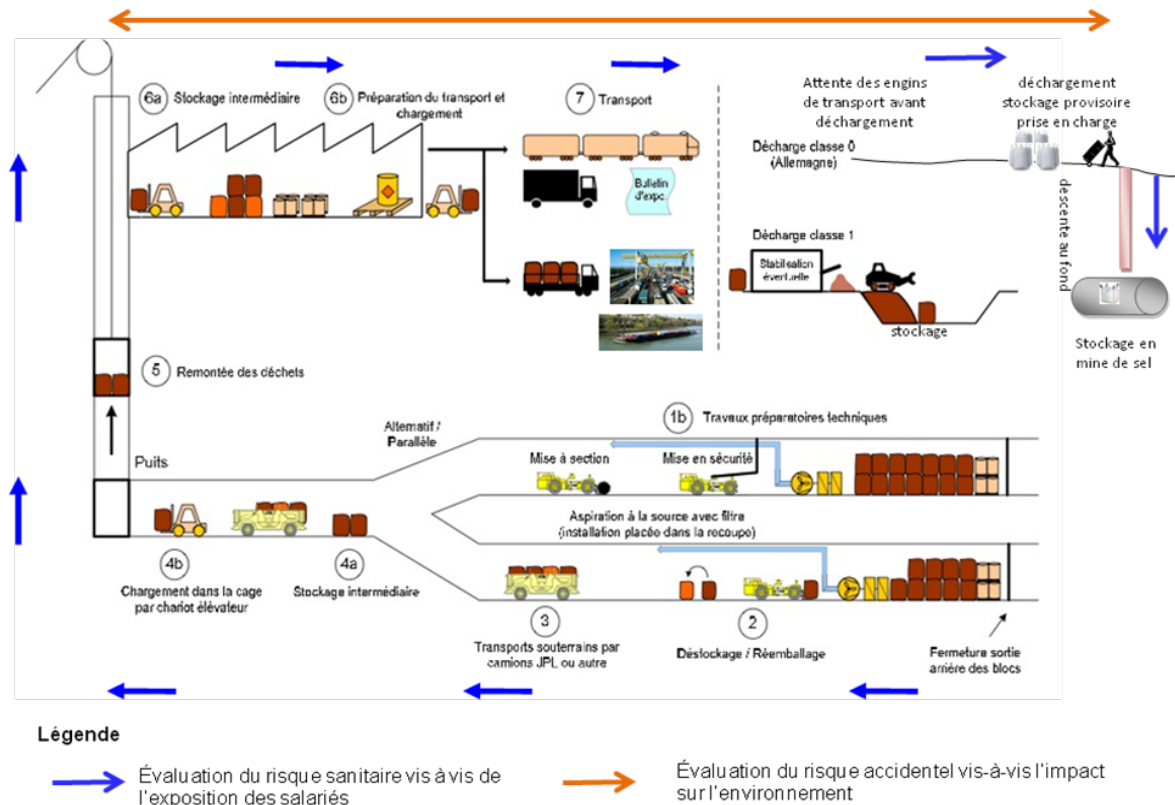


Figure 8 – Visualisation des étapes nécessaires du déstockage des déchets [54]

Pour le déstockage des déchets, l'infrastructure de la mine devrait être adaptée avec un système d'aéragage supplémentaire, composé d'un ventilateur et un bloc de filtres, visant à assurer les conditions de sécurité pour le personnel. L'emplacement et les caractéristiques de cet équipement supplémentaire ont été étudiés par l'Institut Suisse de Promotion de la Sécurité qui préconise une aspiration à la source à déplacer au fur et à mesure de l'avancement du déstockage d'un bloc [33], ce qui crée une contrainte supplémentaire par rapport aux méthodes mise en œuvre durant la phase de stockage.

En termes d'organisation, afin d'accélérer les travaux de déstockage, il faudrait travailler sur deux chantiers parallèles et sur deux postes par jour : une équipe minière pour les travaux de mise à section et sécurité des galeries et une équipe de déstockage. Il a été estimé ainsi qu'environ 72 colis pourraient être déstockés par jour. Le besoin en personnel serait d'environ 40 personnes au total.

La durée des opérations de déstockage des déchets serait au minimum de 4 à 5 ans [33] à laquelle il faut ajouter la durée des démarches administratives préalables, des travaux préparatoires et de la fermeture définitive du bloc 15 en fin de chantier que l'on peut estimer à 2 ou 3 ans.

La Figure 9 décrit en détail toutes les opérations liées à un déstockage des déchets.

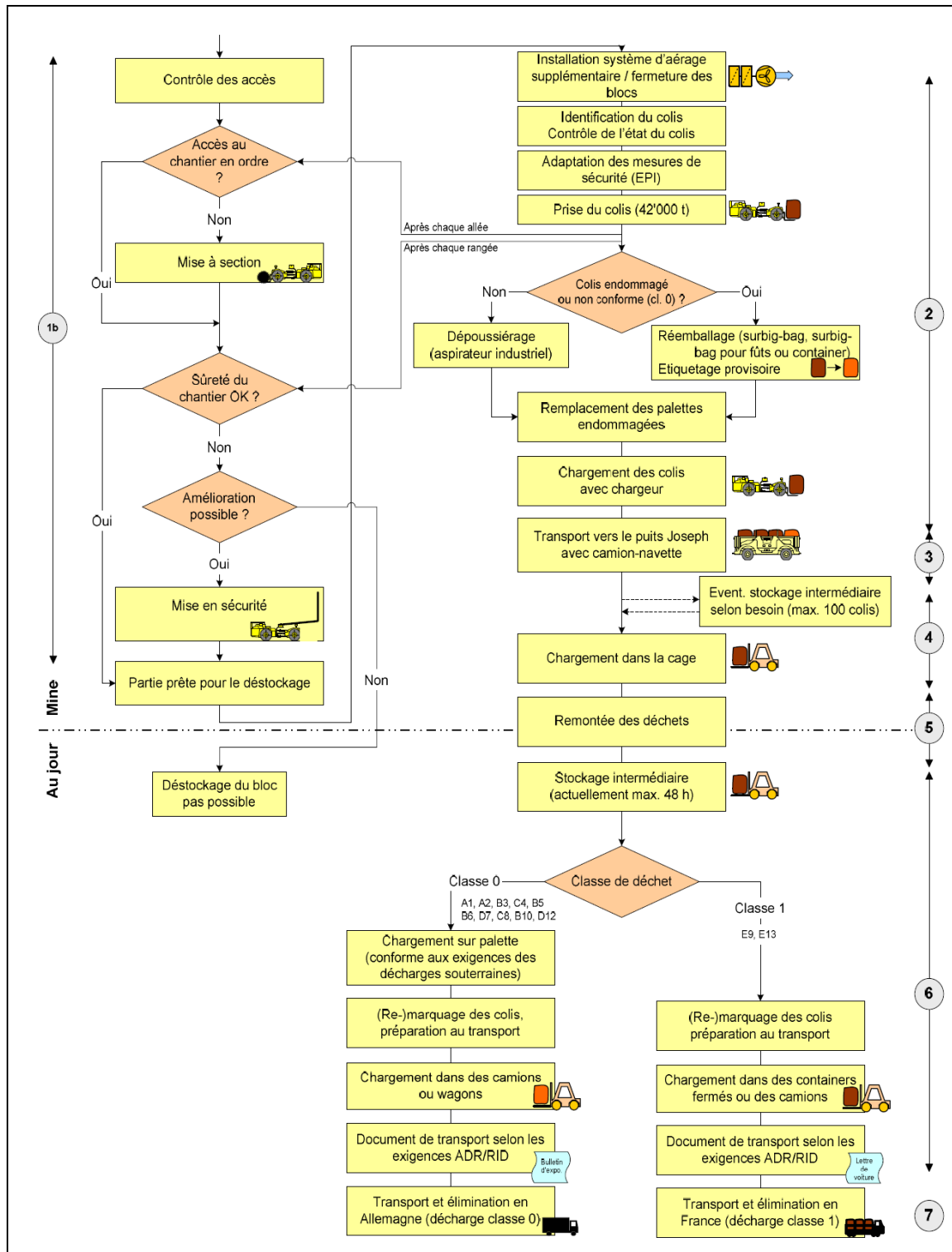


Figure 9 - Phases de l'exercice de la réversibilité [34]

La variante « réversibilité » comporte de fortes contraintes d'un point de vue logistique, technique et de sécurité du travail.

- Les travaux de déstockage devraient être réalisés quasiment en flux tendu, du fait des faibles capacités de stockage intermédiaire. En cas de transport par route vers les sites les plus proches, la cadence de 70 à 72 colis par jour nécessiterait l'emploi de 3 camions articulés.
- La convergence des terrains, très visible dans le stockage, pourrait rendre difficile la reprise des colis (la hauteur résiduelle au-dessus des colis peut être localement trop faible et il est même possible que certains colis soient déjà écrasés sous le toit). Il ne peut donc pas être exclu que, dans certains cas, l'état des galeries soit devenu tel que certains colis ne puissent être enlevés sans que cette opération ne présente un risque trop élevé pour les travailleurs (risque minier et chimique en cas d'épandage). On ne peut donc pas exclure qu'une partie des déchets doive, indépendamment de la problématique du bloc 15, être laissée dans la mine ; cet aspect a clairement été identifié par les experts du COPIL ([59] – Conclusions recommandations – Difficultés possible du retrait).
- Le risque pour les personnels est globalement plus élevé que lors de la phase de stockage puisque le déstockage nécessite, lors de la reprise et du réemballage, une manipulation de colis potentiellement usagés (risque accru de contamination par épandage suite à la déchirure de big-bags ou à la chute de colis). Ce risque est maîtrisable par la mise en place de mesures supplémentaires par rapport à la phase de stockage (aspiration à la source, équipements de protection individuelle, précautions supplémentaires en cas de chute de colis et épandage de produit) mais il reste complexe et critique selon les produits.

De même, les éventuelles interventions dans les zones contaminées par les fumées de l'incendie du bloc 15 nécessitent des mesures de protection particulières et contraignantes.

Globalement, le risque d'accident paraît important car il s'agit d'opérations complexes de manutention et en prise avec un environnement et des aspects chimiques inhabituels.

En ce qui concerne les aspects matériels, le déstockage nécessiterait d'acquérir de nouveaux engins et de confier la réalisation des travaux miniers à un personnel qualifié.

### **3.1.5 Résumé des dangers et risques liés à la réversibilité**

Les dangers et risques liés au déstockage des déchets entreposés à StocaMine, que ce déstockage soit total ou partiel, ont été présentés sous forme conceptuelle sur des schémas intégrant l'ensemble des tâches associées au déstockage [58a].



Les étapes majeures identifiées rassemblent plusieurs tâches unitaires qui sont supposées présenter des dangers ou risques pouvant être analysés de manière homogène comme :

- l'entretien minier,
- la reprise des colis, leur reconditionnement et transport jusqu'en surface ;
- le transport vers le lieu de stockage identifié ;
- le restockage dans le nouveau site.

Les types de risque associés à ces tâches sont (Figure 10) :

- le risque minier, spécifique au contexte dans lequel le stockage se situe ;
- le risque mécanique (risque de dommage corporel sur les travailleurs), quelle que soit l'étape considérée (déstockage, transport, restockage) ;
- le risque physico-chimique, par exposition des travailleurs, également quelle que soit l'étape ;
- le risque de pollution accidentelle, lors des manipulations dans la mine (air extérieur) ou lors du transport (air, cours d'eau, nappe, sol) ;
- le risque de remobilisation de polluants vers la nappe, l'air, les eaux de surface et ses implications (irrigation, consommation, contact).



19 nov. 2010 - 10 / 24

Figure 10 - Schéma conceptuel du déstockage et risques associés [58a]

### 3.2 DESCRIPTION DU SCÉNARIO DE STOCKAGE ILLIMITÉ

Ce scénario consiste à laisser sur le site de StocaMine la totalité des déchets au sein des blocs creusés à cet effet et à mettre en place, le cas échéant, des dispositifs nécessaires pour limiter, réduire ou supprimer les effets dommageables de ce stockage sur l'environnement et la santé.

Pour cela, ce scénario a fait l'objet de nombreuses études commandités par StocaMine auprès de bureau d'études français ou étrangers, d'une part, au moment du dépôt du dossier de demande d'autorisation d'exploiter et, d'autre part, à la suite de l'incendie et de l'arrêt d'exploitation afin d'examiner les mesures pertinentes pour sa mise en œuvre. On retiendra principalement les références suivantes, correspondant à des études réalisées pour StocaMine après l'incendie :

- [28] *Etude géologique, hydrogéologique et géotechnique du centre de stockage de StocaMine, Wittelsheim (Haut Rhin), MICA Environnement, avril 2004.*
- [29] *Détermination des dangers, Institut Suisse pour la Promotion de la Sécurité, juillet 2004.*
- [30] *Stockage souterrain de Wittelsheim : évaluation des risques suite au confinement de déchets dans la mine. Risques dus aux substances chimiques, BMG Engineering AG, juillet 2004.*
- [31] *Etude d'impact, rapport synthèse, Institut Suisse pour la Promotion de la Sécurité, juillet 2004.*
- [36] *Etude technique détaillée du confinement complémentaire du bloc 15, STOCAMINE, SOLETANCHE-BACHY juillet 2006*
- [40] *ERCOSPLAN (2008). Etude de faisabilité. Remblayage des cavités souterraines de Stockage des Déchets de StocaMine, Wittelsheim/France. Rapport ERCOSPLAN. EGB 07-042. 02 septembre 2008.*

En 2010 et 2011, l'INERIS a réalisé plusieurs études complémentaires. Elles permettent de préciser les approches précédentes et d'obtenir une meilleure évaluation des phénomènes. Par ailleurs, elles identifient les moyens de maîtrise du risque à y associer pour répondre aux objectifs fixés, sanitaire et environnementaux. Ces principales études sont :

- [53] *GHOUREYCHI M. - Etude géomécanique du stockage de StocaMine – INERIS-DRS-10-108130-14273A – Décembre 2010*
- [55] *GOMBERT P. - Stockage souterrain de StocaMine (68) - Etude hydrogéologique de l'ennoyage du site – INERIS-DRS-10-108130-12810B – Mars 2011*
- [56] *HENNEBERT P. - StocaMine - Evaluation du terme source dans le scénario du stockage illimité : quantités de contaminants stockés, et calculs des concentrations potentielles en solution et en phase gazeuse en cas d'ennoyage - INERIS-DRC-11-108130-08465A – Juillet 2011*
- [57] *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*



A l'issue de ces études complémentaires, il est apparu que la mise en place de barrières ouvragées positionnées aux endroits prévus par le bureau ERCOSPLAN [40] pouvait permettre de répondre à ces objectifs. En effet, le faible coefficient de perméabilité de ces ouvrages permet de retarder à la fois l'envoyage du stockage et la sortie de la saumure polluée de celui-ci. Pour cette raison, deux scénarios ont été étudiés, l'un avec barrières ouvragées, l'autre sans.

Outre l'impact à long terme sur l'environnement et la santé, le premier de ces deux scénarios présente également des risques particuliers liés, d'une part, aux interventions dans la mine pour la sécurisation de l'environnement minier préalables à la réalisation des barrières et, d'autre part, aux travaux de mise en place proprement dite des barrières.

L'évaluation de l'incidence sur la santé des travailleurs a été estimée à partir de la durée des travaux et des données statistiques d'accident du travail.

L'impact sur l'environnement prend en compte l'impact sur la nappe d'Alsace des 11 substances potentiellement dissoutes dans la saumure [56] (As, Ba, Bi, Cd, CN, Co, Cr, Hg, Ni, Pb, Sb) – sans tenir compte des chlorures - et l'impact dans l'air de 4 gaz (arsine, acide cyanhydrique, mercure et phénol). Cet impact est évalué par son effet tant sur les populations, par le biais de l'eau et des gaz, que sur la biodiversité. Les phénomènes et leur déclinaison en deux scénarios de stockage illimité sont détaillés au chapitre 4.

En résumé, les dangers et risques du stockage illimité des déchets entreposés à StocaMine ont été présentés sous forme conceptuelle sur des schémas intégrant l'ensemble des tâches [58a].

Les étapes majeures identifiées rassemblent plusieurs tâches unitaires qui sont supposées présenter des dangers ou risques pouvant être analysés de manière homogène comme :

- l'entretien minier ;
- les travaux de mise en place des barrières ouvragées.

Les types de risque associés à ces tâches sont :

- le risque minier, spécifique au contexte dans lequel le stockage se situe ;
- le risque « mécanique » (risque de dommage corporel sur les travailleurs), lors des travaux de mise en œuvre des barrières ;
- le risque de remobilisation de polluants vers la nappe, l'air, les eaux de surface et ses implications (consommation directe de l'eau, contact, irrigation des terres agricoles).



## 4. COMPARAISON DES SCÉNARIOS

La méthodologie décrite préalablement a été appliquée aux scénarios extrêmes, déstockage total ou stockage illimité, et à plusieurs de leurs variantes. Ainsi, pour le déstockage total, les sites de destination considérés ont été :

- les sites souterrains allemands d’Heilbronn et de Herfa-Neurode pour tous les déchets ou pour les déchets ultimes (K0) uniquement ;
- le site de surface français de Drambon pour les déchets dangereux (K1) dans le cas où seuls les déchets ultimes étaient transférés en mine de sel allemande.

Enfin, pour le déstockage, un scénario consistant à laisser le bloc 15 en place a été examiné. Pour le scénario de stockage illimité, deux variantes ont été examinées, sans et avec mise en place des barrières.

N°	Scénario
Scénario A	Stockage illimité à StocaMine sans barrière
Scénario B	Stockage illimité à StocaMine avec barrières
Scénario C	Déstockage et restockage total à Heilbronn (transport routier)
Scénario Cbis	Déstockage hors bloc 15 (avec barrières) et restockage à Heilbronn (transport routier)
Scénario D	Déstockage et restockage K1 à Drambon et K0 à Heilbronn (transport routier)
Scénario E	Déstockage et restockage total à Herfa-Neurode (transport routier)
Scénario Ebis	Déstockage sauf bloc 15 (avec barrières) et restockage à Herfa-Neurode (transport routier)
Scénario F	Déstockage et restockage K1 à Drambon et K0 à Herfa-Neurode (transport routier)

*Tableau 3 - Scénarios examinés*

### 4.1 DONNÉES D’ENTRÉE

Les données d’entrées disponibles pour la comparaison des scénarios ont plusieurs origines. Les provenances principales sont :

- des données établies et ou détenues par StocaMine : données minières, fiches déchets (nature, quantité, caractérisation ...), plan de localisation des déchets...
- des données produites par des bureaux d’études et experts missionnés par StocaMine jusqu’en 2009 : études géomécanique et hydrogéologique initiales, en particulier, l’étude des sites de stockage allemands en mine de sel [49] ;

- des données publiques issues de la littérature scientifique et technique : données sur le comportement mécanique du sel, facteurs de caractérisation de substances toxiques pour l'eau et l'air, statistiques d'accidentologie (mine, BTP, industrie chimique), analyse du cycle de vie (ACV) de sites de stockage de déchets dangereux ;
- des données produites spécifiquement par l'INERIS pour établir la comparaison à la suite d'un examen critique des études antérieures et après réalisation des études complémentaires : études géomécanique, hydrogéologique et géochimique, réajustement et réinterprétation de données précédentes (déchets, volumes de vides/saumure polluée), terme source, faisabilité du transport...

## **4.2 DÉTAIL DE L'APPROCHE PAR SCÉNARIO**

Les paragraphes qui suivent présentent les principaux éléments permettant la comparaison des différents scénarios relatifs au devenir des déchets de StocaMine. Ils complètent et accompagnent les diaporamas de présentation des résultats au COPIL [58e] et [58f] en précisant certains aspects.

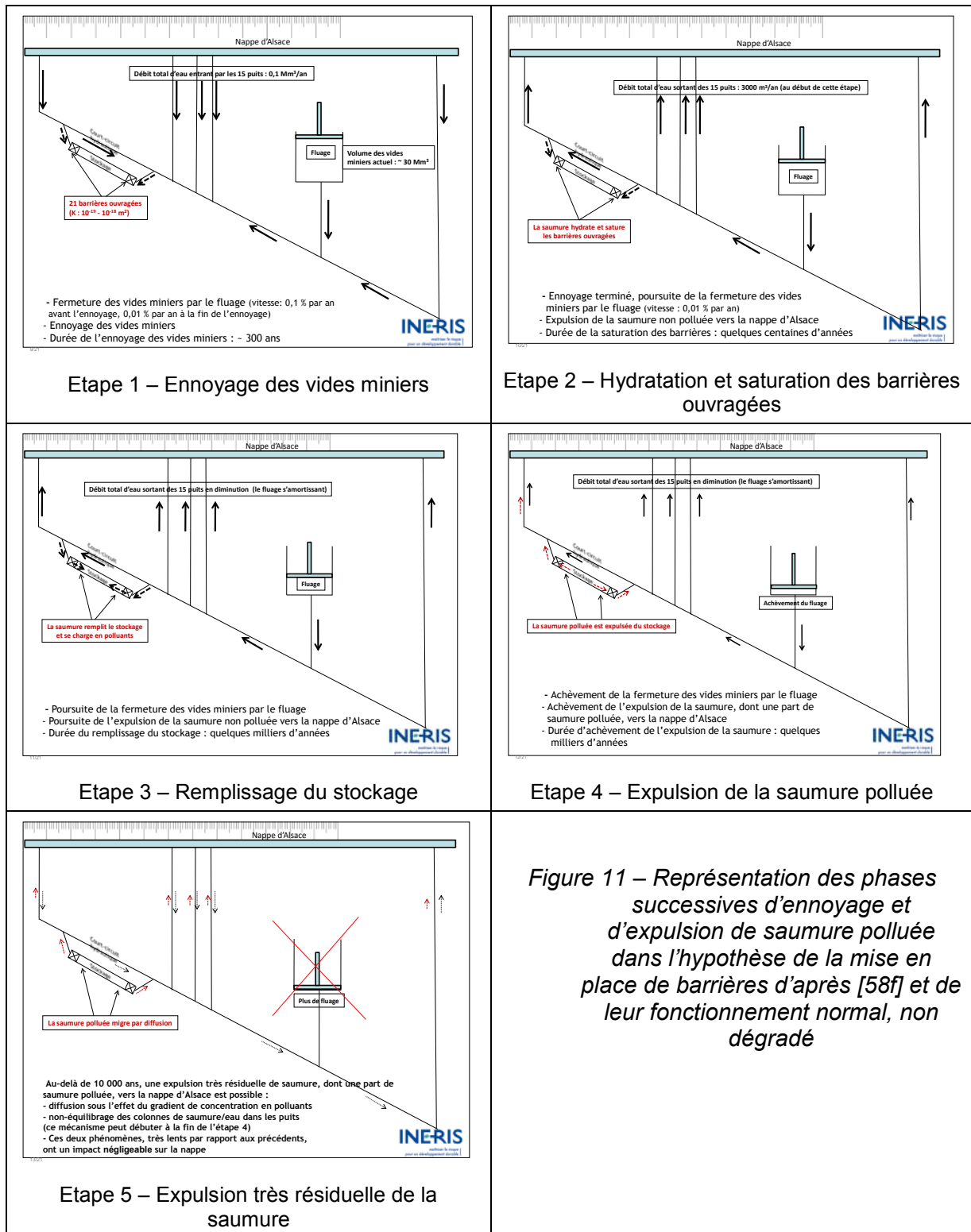
### **4.2.1 Impact à long terme des déchets de StocaMine dans l'hypothèse de leur maintien en place (Scénarios A et B)**

On considère qu'à plus ou moins long terme, les ouvrages d'accès (puits) aux ouvrages souterrains du site de StocaMine ne resteront pas étanches. De ce fait, l'ennoyage de ce site est inéluctable.

Les études géomécaniques [53] et hydrogéologiques [55] réalisées par l'INERIS ont mis en évidence que le mécanisme prépondérant régissant le transport de polluants vers la nappe aquifère (nappe d'Alsace) est la fermeture progressive des vides miniers sous l'effet du fluage du sel une fois que l'ennoyage total de la mine et du stockage est effectivement réalisé. La communauté scientifique internationale spécialiste du sel admet unanimement que ce mécanisme relativement lent ne prend fin qu'à très long terme, une fois que tous les vides souterrains sont entièrement refermés.

Il existe un autre mécanisme potentiel, correspondant à l'écoulement consécutif à un gradient hydraulique résultant des différences de cotes altimétriques du toit de sel en amont et en aval du stockage. Ce phénomène, pouvant intervenir à très long terme, après que tout l'espace vide souterrain aura été fermé (typiquement après 10 000 ans). Il est estimé au plus à 140 m<sup>3</sup> par an et a donc été négligé.

Une fois l'ennoyage terminé, l'expulsion de la plus grande partie de la saumure polluée par les déchets contenue dans les vides miniers (volume occupé par la saumure polluée) pourrait s'étendre sur plusieurs dizaines de siècles.



*Figure 11 – Représentation des phases successives d'ennoyage et d'expulsion de saumure polluée dans l'hypothèse de la mise en place de barrières d'après [58f] et de leur fonctionnement normal, non dégradé*

Les mesures d'affaissement de la surface du sol, lié à la fermeture progressive des vides miniers, disponibles (données MDPa) ont permis de montrer que le volume des vides générés par toute l'exploitation du secteur ouest (avec laquelle le stockage de StocaMine est en communication), soit 200 Mm<sup>3</sup>, s'est réduit (données de 2005) à 40 Mm<sup>3</sup> (soit 20 % du volume initial) du fait de la méthode d'exploitation basée sur de longues tailles foudroyées (le volume des galeries étant négligeable devant celui des terrains de foudroyage).

Ce volume continuera à se réduire jusqu'à atteindre environ 30 Mm<sup>3</sup> dans 3 siècles, période correspondant à la fin évaluée de l'ennoyage. A ce moment-là, le volume des vides sus-jacents au stockage de déchets, soit à une profondeur inférieure à 550 m, sera de 6,8 Mm<sup>3</sup>. Compte tenu du sens de circulation de la saumure, seul ce dernier volume pourrait être pollué par les déchets, le reste (23 Mm<sup>3</sup>) étant situé en amont hydraulique.

Le débit de remontée de la saumure lorsqu'elle commencera à atteindre la nappe d'Alsace (c'est-à-dire à la fin de l'ennoyage) est estimé à environ 3 000 m<sup>3</sup> par an (cette valeur résulte d'une vitesse de diminution des vides du foudroyage estimée à 0,01 % par an à la fin de l'ennoyage). Ce débit diminuera progressivement sur le très long terme au fur et à mesure de la fermeture des vides.

Deux scénarios ont été étudiés :

- scénario A : l'abandon des déchets en l'état, sans précaution particulière : dans ce cas, les 6,8 Mm<sup>3</sup> de saumure évoqués précédemment se chargeront en polluants en traversant le stockage ; leur remontée vers la nappe d'Alsace se ferait, dans 3 siècles, avec un débit initial de 3000 m<sup>3</sup> par an, au travers de l'ensemble des 15 puits du secteur Ouest.
- scénario B : l'abandon des déchets après mise en place de barrières ouvragées circonscrivant la zone de stockage au plus près. Elles auraient pour but de retarder la pénétration de saumure au travers du stockage et son contact avec les déchets pendant plusieurs siècles (on viserait un millier d'années) au cours desquels la convergence des ouvrages résultant du fluage du sel aurait réduit le volume des vides du stockage c'est-à-dire les vides résiduels existant entre les big-bags et les fûts et au sein de ces derniers (porosité). Pour une bonne efficacité de ces barrières, il conviendrait de maintenir, autant que possible, un écoulement privilégié au travers d'une ou plusieurs galeries voisines du dépôt, dans l'objectif de favoriser un court-circuit hydraulique du stockage. Cette disposition conférerait aux barrières ouvragées une résistance hydraulique élevée. Le volume résiduel de vides au sein du stockage au début de l'arrivée de la saumure dans le dépôt est estimé à 7000 m<sup>3</sup> (sur la base d'une porosité de 33 % appliquée à un volume des déchets de 22 000 m<sup>3</sup>, leur densité étant estimée égale à 2 ; la vitesse de convergence des galeries étant voisine de 1 % par an avant l'ennoyage, les galeries vides se seront refermées au bout d'environ 100 ans, soit largement avant l'arrivée de la saumure au sein du stockage). Dans ce scénario, seul ce volume de 7000 m<sup>3</sup> de saumure serait pollué et c'est ce volume maximal qui pourrait être expulsé sur le long terme sous l'effet de la poursuite du fluage du sel. En considérant une vitesse maximale de compaction résiduelle des déchets égale à celle des terrains foudroyés, soit 0,01 % par an après ennoyage, le débit maximal d'expulsion de la saumure polluée est estimé à 0,7 m<sup>3</sup> par an au début de

sa sortie du stockage. Cette vitesse et donc ce débit diminueraient ensuite sur le très long terme. La saumure polluée sortant du stockage serait diluée dans la saumure intacte contenue dans les vides sus-jacents au stockage. Le mélange sera susceptible d'atteindre la nappe d'Alsace au travers des puits les plus proches du stockage (maximum 5 : Joseph, Else, Amélie 1, Amélie 2 et Max), sous l'effet du mécanisme de fermeture des vides miniers.

L'étude géochimique réalisée par l'INERIS [56] a permis de calculer les concentrations de la saumure en polluants (des 10 principaux polluants métalliques et du cyanure jouant le rôle de complexant) à la source (au sein du stockage circonscrit ou non par les barrières) susceptibles d'impacter l'environnement, dans chacun de ces deux scénarios. Elle a montré que 7 métaux (plomb, nickel, cobalt, baryum, bismuth, cadmium, arsenic<sup>4</sup>) présenteraient des concentrations stables et constantes dans la saumure (indépendantes du volume de dilution car fixées par les équilibres de solubilité) alors que les 3 autres métaux (mercure, chrome, antimoine) seraient fortement dépendantes du rapport masse de déchets/volume disponible.

La modélisation des impacts des déchets laissés en place à StocaMine est basée sur :

- le volume de saumure polluée qui serait expulsée au fil du temps vers la nappe, soit 6,8 Mm<sup>3</sup> ou 7000 m<sup>3</sup> selon le cas ;
- les concentrations en polluants dans chacun de ces deux cas.

Ces deux données ont permis de calculer les masses respectives de polluants rejetés dans la nappe d'Alsace utiles à la modélisation des impacts. Celles-ci ont été introduites dans le modèle multimédia Impact 2002+ qui prend en compte des facteurs de caractérisation propres à chacune de ces substances, ce qui permet d'exprimer, comme déjà précisé, un impact global sous la forme de DALY (sanitaire) et PDF.m<sup>2</sup>.an (environnemental).

A titre indicatif, l'impact de l'utilisation de l'eau de nappe en eau de boisson par les riverains des stockages considérés a aussi été évalué à partir d'une hypothèse de consommation plausible en utilisant les facteurs de caractérisation spécifiques de cet usage, pour chacune des substances concernées. Cet impact particulier est très faible ; il représente moins de 1 % de l'indicateur sanitaire global.

Avant l'expulsion de saumure polluée, l'air contenu dans les vides miniers serait chassé vers l'atmosphère extérieure sous l'effet de l'ennoyage de la mine. Malgré l'absence de mise en évidence de polluants dans l'atmosphère du stockage, lors de mesure faite par l'INERIS, l'hypothèse a été faite que cet air pourrait se charger en polluants émis par les déchets suite à la dégradation ou rupture des fûts. Quatre polluants ont été retenus (mercure, arsine, acide cyanhydrique, phénol). Les concentrations potentielles dans l'air et donc les masses de polluants rejetées vers l'atmosphère externe ont été déduites de mesures faites en tête de fûts (source StocaMine) qui constitue une approche majorante.

---

<sup>4</sup> L'arsenic est, en fait, dans une situation intermédiaire entre les deux familles de polluants.



Comme pour l'eau, deux impacts ont été pris en compte :

- un impact global calculé par le modèle Impact 2002+ (même méthode que précédemment, facteurs de caractérisation propres à l'air) ;
- un impact « local » en considérant une exposition directe des personnes à une émission dans un local (sous-sol, rez-de-chaussée d'habitation). Ce calcul ponctuel est également réalisé au moyen du modèle Impact 2002+.

#### **4.2.2 Impact à long terme du restockage des déchets (en tout ou partie) de StocaMine dans la mine allemande de Heilbronn (scénarios C, Cbis et D)**

D'après [49], la mine de sel d'Heilbronn, où le sel continue d'être extrait entre 210 et 230 m de profondeur, est autorisée à stocker dans les vides ainsi créés des déchets ultimes à hauteur de 50 000 t/an depuis 1992 (soit, sur les 20 années écoulées, un tonnage de 1 Mt). Pour la suite du scénario, faute d'informations disponibles, l'hypothèse de la similitude de composition moyenne des déchets entrant à Heilbronn avec ceux stockés à StocaMine a été posée.

Depuis 1992, l'exploitation de sel s'est traduite par un volume extrait de 1 à 2 Mm<sup>3</sup> par an. En 1992, le volume de vides résultant de l'exploitation antérieure (il y a donc une vingtaine d'années) était de l'ordre 48 Mm<sup>3</sup> (40 Mm<sup>3</sup> pour la mine de Heilbronn et 8 Mm<sup>3</sup> pour la mine de Kochendorf qui lui est connectée). Le volume est donc, à ce jour, de 48 + (20 ans x 1 à 2 Mm<sup>3</sup>/an) soit de 68 à 88 Mm<sup>3</sup> (on néglige le volume occupé par les déchets, inférieur à 1 Mm<sup>3</sup>).

Une première hypothèse quant au devenir de la mine d'Heilbronn est qu'elle reste éternellement sèche, comme cela est *a priori* considéré en Allemagne. Dans ce cas, l'impact à long terme du stockage des déchets, tant sanitaire qu'environnemental, serait nul. Toutefois, de nombreux experts s'accordent à dire que toute mine de sel est amenée un jour à être ennoyée, même au bout d'un temps relativement long. C'est l'hypothèse retenue par l'INERIS quel que soit le site souterrain salifère considéré.

L'hypothèse alternative, non envisagée par l'exploitant actuel, est donc qu'à terme, l'eau s'introduise dans le site d'Heilbronn. La fermeture progressive des ouvrages miniers constituerait alors le moteur de l'expulsion de saumure (polluée par le contact avec les déchets) vers le milieu naturel (ceci de manière totalement analogue au cas de StocaMine). Cette intrusion d'eau dans la mine d'Heilbronn est une éventualité citée dans le rapport de B. Feuga [49] qui indique que « *il est en effet justifié de considérer qu'au bout d'un temps plus ou moins long, tous les vides souterrains y compris ceux des sites de stockage, seront remplis de saumure.* » Cet avis s'appuie sur le fait que :

- il existe une nappe salée au toit du sel à quelques dizaines de mètres seulement du niveau du stockage.
- trois aquifères se situent au-dessus de l'exploitation dont le plus proche (Muschelkalk) se trouve à seulement 50-100 m de la mine.
- une mine proche (Friedrichshall, située à 1,5 km de Kochendorf) a déjà fait l'objet d'une invasion d'eau dans le passé.

Dans les 3 scénarios C, Cbis et D, le rapport volume de saumure-masse de déchets étant comparable à celui du scénario A de StocaMine, la qualité de la saumure qui serait expulsée et qui impacterait les aquifères a donc été raisonnablement estimée à partir de la modélisation hydrogéochimique faite pour le scénario A de StocaMine, à défaut de données disponibles permettant une étude spécifique. Les conclusions de l'étude du « terme source » de StocaMine [56] quant au comportement des substances ont également été utilisées dans le cas d'Heilbronn.

Alors, l'impact à long terme de la saumure qui serait rejetée vers le milieu des seuls déchets provenant de StocaMine stockés à Heilbronn se calcule (proportionnellement aux masses respectives des déchets) ainsi :

- Pour les 3 polluants (mercure, chrome et antimoine) et pour le cyanure en tant que complexant, on considère que la totalité de leur masse présente dans les déchets est libérée, quel que soit le volume de saumure dans lequel ils seraient immergés.
- Pour les 7 autres, les concentrations sont prises égales à celles calculées pour StocaMine car ces concentrations sont indépendantes de la dilution, en faisant l'hypothèse que la chimie globale du milieu est identique.

Des incertitudes existent quant à certaines caractéristiques de la mine et du stockage d'Heilbronn : pour le calcul des masses des polluants rejetés dans l'environnement, nous avons retenu un volume maximal de vides de la mine de 68 Mm<sup>3</sup>.

Trois variantes de scénarios de restockage à Heilbronn sont considérés, soit l'ensemble des déchets (44 000 t – Scénario C), soit l'ensemble des déchets sauf ceux du bloc 15 (et donc une masse réduite en proportion – Scénario Cbis), soit la seule part de déchets dits ultimes (environ 22 000 t – Scénario D).

Le calcul des impacts potentiels pour chacun de ces trois scénarios a été effectué sur le même principe que celui utilisé pour le scénario où les déchets sont laissés en place à StocaMine (modèle Impact 2002+). Compte tenu des résultats du calcul des émissions d'air (pollué) vers la surface à StocaMine (scénarios A et B), ce phénomène a été négligé (il est entre 100 et 1000 fois plus faible que l'impact sur l'eau).

#### **4.2.3 Impact à long terme du restockage des déchets (en tout ou partie) de StocaMine dans la mine allemande de Herfa-Neurode (scénarios E, Ebis et F)**

La mine de sel de Herfa-Neurode, en Allemagne, est autorisée à stocker des déchets ultimes (dits K0) à hauteur de 200 000 t/an. Le stockage a débuté en 1972 dans cette mine au sein d'une veine de potasse d'une épaisseur de 2 à 6 mètres est exploitée à environ 600 mètres de profondeur. L'exploitation de la mine se fait en chambres et piliers. L'épaisseur globale de formation salifère au sein de laquelle la mine et donc le stockage sont établis est de 300 à 400 mètres. Une couche d'anhydrite de 50 mètres d'épaisseur sépare le sel des aquifères supérieures contenues dans les dolomies, calcaires et formations superficielles. L'aquifère le plus proche du stockage se trouverait à environ 150 à 250 mètres au-dessus, selon la localisation Enfin, la superficie du stockage serait d'environ 20 km<sup>2</sup> pour une superficie de la mine de 400 km<sup>2</sup> dont 130 km<sup>2</sup> de galeries.

En 1980, 80 000 t de déchets ultimes y avaient été stockées. En 2011, la masse stockée serait d'environ 2,75 Mt. Le volume stocké atteindra, au terme de l'exploitation, 6 Mt environ. La part de déchets en provenance de StocaMine ne représenterait alors que 0,8 % du total. Pour la suite du scénario, faute d'informations disponibles, l'hypothèse de la similitude de composition moyenne des déchets entrant à Herfa-Neurode avec ceux stockés à StocaMine a été posée, comme cela a été fait pour Heilbronn.

Les chambres de stockage sont, une fois les déchets déposés, 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. En cas d'ennoyage, le volume d'eau (saumure) en contact avec les déchets serait donc faible. De ce point de vue, les caractéristiques et la configuration d'Herfa-Neurode, lors de l'ennoyage, serait donc proche de celle de StocaMine avec barrières (scénario B).



Figure 12 – Extrait de Stockage souterrain – Informations techniques – K+S  
[http://www.ks-entsorgung.com/fr/pdf/informations\\_techniques\\_utd.pdf](http://www.ks-entsorgung.com/fr/pdf/informations_techniques_utd.pdf)

Comme pour Heilbronn, dans l'hypothèse admise en Allemagne, la mine d'Herfa-Neurode resterait éternellement sèche. Dans ce cas, l'impact à long terme du stockage des déchets, tant sanitaire qu'environnemental, serait nul. Toutefois, là encore, une autre hypothèse a été retenue par l'INERIS considérant comme probable l'ennoyage à long terme de la mine et du stockage, en dépit du contexte hydrogéologique plus favorable d'Herfa-Neurode par rapport à celui d'Heilbronn.

A nouveau, la qualité de la saumure qui serait expulsée par le fluage du sel et qui impacterait les aquifères est estimée à partir de la modélisation hydrogéochimique faite pour le scénario B de StocaMine, faute de données disponibles pour une étude spécifique. Les conclusions de l'étude du « terme source » de StocaMine [56] quant au comportement des substances ont également été utilisées dans le cas d'Herfa-Neurode.

L'impact à long terme de la saumure rejetée vers le milieu des seuls déchets provenant de StocaMine stockés à Herfa-Neurode a été considéré (modèle Impact 2002+) comme identique à celui du scénario StocaMine avec barrières (scénario B).

En effet, compte tenu du mode de remplissage des chambres et de fermeture des ouvrages, il a été retenu, au terme de l'exploitation du site, une masse de déchets de 6 Mt présentant une porosité de 33 % (porosité du déchet et vides inter colis à terme). Le volume de saumure qui entrerait au contact des déchets serait donc de 2 Mm<sup>3</sup>.

Trois variantes de scénarios de restockage à Herfa-Neurode sont considérés, soit l'ensemble des déchets (44 000 t - Scénario E), soit l'ensemble des déchets sauf ceux du bloc 15 (et donc une masse réduite en proportion - Scénario Ebis), soit la seule part de déchets ultimes (environ 22 000 t - Scénario F).

Compte tenu des résultats du calcul des émissions d'air (pollué) vers la surface à StocaMine (scénarios A et B), ce phénomène a été négligé (il est entre 100 et 1000 fois plus faible que l'impact sur l'eau).

#### **4.2.4 Impact à long terme du restockage des déchets dangereux de StocaMine dans le site de Drambon (scénarios D et F)**

Rappelons tout d'abord que les caractéristiques du site de Drambon ont été examinées, en particulier concernant sa capacité à accueillir les déchets qui seraient issus du déstockage de StocaMine et que l'exploitant, contacté, a confirmé que les autorisations en permettraient l'accueil. Les déchets de StocaMine qui pourraient être stockés en installation de stockage de déchets dangereux en France comportent principalement :

- les déchets amiantés (classe StocaMine E13) pour une masse d'environ 3 300 tonnes, 85 % en big-bags et 15 % en palettes filmées ;
- les résidus d'incinérations (REFIOM et REFIDI) pour une masse d'environ 19 700 tonnes, 95 % en big-bags et 5 % en fûts.

Une composition moyenne des résidus d'incinération a été transmise au laboratoire de l'exploitant du site envisagé qui a confirmé la nécessité et la possibilité d'inertiser ces déchets pour les rendre acceptables dans le site.

La FNADE (Fédération Nationale des Activités de la Dépollution et de l'Environnement), qui regroupe les professionnels du secteur, en partenariat avec l'ADEME, a fait réaliser par « Bio Intelligence Service » l'évaluation des impacts environnementaux de l'élimination des déchets dangereux en installation de stockage autorisé [61]. Son objectif était de parvenir à une meilleure connaissance de la filière sur le plan des impacts environnementaux, en se fondant sur une méthodologie reconnue et normalisée au niveau international : l'analyse du cycle de vie (normes ISO 14040 à 14043). Cette analyse, comme le prévoit la norme, a fait l'objet d'une revue critique par un tiers-expert.

Cette analyse a porté sur les 10 principaux sites exploités auprès desquels une enquête, par l'intermédiaire d'un questionnaire, a été réalisée sur l'ensemble des activités de l'année 2000 et les résultats ont été transposés sous la forme d'un « site moyen » générique. Dans cette étude, les émissions vers l'environnement, notamment de lixiviat, ont été modélisées sur différentes périodes allant jusqu'à 10 000 ans après ouverture du site en intégrant la phase de post-fermeture.

Le rapport de cette étude [61] décrit la démarche développée pour évaluer les impacts sanitaires et environnementaux de la filière de stockage des « Déchets Industriels Spéciaux » appelés aujourd'hui « déchets dangereux » et présente les principaux résultats de cette évaluation. Il présente le bilan estimé de l'impact d'une tonne de déchet de classe 1 générique entrant dans un site par étapes de vie des déchets et par « enjeu » impacté. L'impact de la phase de post-exploitation est donc bien identifié dans la démarche de comparaison mise en œuvre. Les « enjeux » impactés pris en compte dans la comparaison sont, comme pour les autres éléments de scénario, la toxicité humaine et l'écotoxicité aquatique.

Ces éléments ont été utilisés pour le calcul de la part des indicateurs relative au restockage d'une partie des déchets dans le site de Drambon.

Les données brutes d'inventaire évaluées par la FNADE ont été introduites dans le modèle d'évaluation « Impact 2002+ » avec les facteurs de caractérisation correspondants issus de la même base de données que pour les autres approches.

#### **4.2.5 Risques pour les travailleurs lors du déstockage des déchets et autres travaux souterrains à StocaMine (tous les scénarios)**

Le risque pour les travailleurs intervenant au fond pour les travaux miniers ou de réalisation des barrières ouvragés et/ou le déstockage des déchets de StocaMine est évalué à partir de la charge de travail estimée et de l'accidentologie de ce type d'activité (ou d'activités similaires lorsque cette dernière n'est pas disponible). Il intègre à la fois le risque strictement minier (lié à aux conditions de travail en milieu souterrain), le risque mécanique et le risque « chimique » (lié à l'exposition des travailleurs à des substances contenues dans les déchets lors de leur manipulation). Les scénarios de stockage illimité (scénarios A et B) ne comportent pas de composante liée au risque chimique, aucune opération de manipulation des déchets n'étant nécessaire, à l'inverse des scénarios de déstockage (scénarios C et suivants).

Données utilisées :

1. Charge de travail (données StocaMine ou études réalisées pour son compte)<sup>5</sup> :

- 562 300 heures, pour le déstockage hors bloc 15, correspondant à une charge de 40 personnes sur 2 postes de 8 heures pendant 4 ans, soit 320 personnes.an ;
- 99 000 heures pour le déstockage du bloc 15 seul, correspondant à une charge de 15 personnes à deux postes de 6 heures pendant 2,5 ans, soit 75 personnes.an ;
- 17 600 heures pour la fermeture des puits encore ouverts, correspondant à une charge estimée de 10 personnes.an ;

---

<sup>5</sup> Ces charges, issues d'études antérieures, pourraient s'avérer plus élevées en fonction des difficultés effectivement rencontrées lors des travaux.

- de 42 600 à 84 480 heures pour la réalisation de barrières ouvragées près des déchets (entreprise spécialisée et encadrement par StocaMine), correspondant à une charge de 24,2 à 48 personnes.an en fonction des solutions envisagées.

## 2. Accidentologie :

- Les données d'accidentologie intègrent l'ensemble des risques liés aux travaux souterrains, à savoir :
- le taux de fréquence des accidents mortels (pour une période donnée, nombre d'accidents mortels rapporté au nombre total de journées ou d'heures de travail effectuées) ; les données sont issues des statistiques de Charbonnages de France (CdF) ; pour la période 1986-1996 (au cours de cette période, le taux de fréquence a été stable ; au cours de la période immédiatement précédente, les taux de fréquence de CdF avaient été du même ordre de grandeur que ceux connus de l'INERIS pour la COGEMA (mines d'uranium), les MDPA, les mines de fer françaises et les houillères européennes, ce qui fonde le choix de ces données d'entrée) ;
- le taux de gravité (pour une période donnée, nombre de journées d'arrêt de travail rapporté au nombre total de journées de travail effectuées) au fond d'une mine : idem (données CdF) ;
- le taux d'incapacité permanente : statistiques françaises du BTP pour l'année 2009 (à défaut de disposer de données minières).

## 3. Risque chimique :

- En sus du risque minier calculé sur la base des données qui précèdent, un risque spécifique lié à la manipulation de déchets toxiques a été pris en compte. Ce risque a été calculé en considérant la charge de travail liée aux opérations de déstockage et les statistiques d'accidents mortels et d'arrêt de travail de l'industrie chimique française pour 2009.

Pour chacune des composantes du risque (létalité, incapacité temporaire et incapacité permanente), le risque a été exprimé en DALY à partir de « facteurs de caractérisation » (données OMS). Par exemple, un accident mortel est forfaitairement traduit sous forme de 40 DALY ; les journées d'arrêt de travail, pour être exprimées en DALY, sont affectées d'un « facteur de réduction » ; cette valeur donnée par l'OMS a été affinée par l'INERIS sur les statistiques de CdF portant sur le siège effectif des lésions) pour tenir compte du fait qu'à nombre de jours d'arrêt identique, et selon le type de blessure, les accidents n'ont pas le même impact sur la « bonne santé » des blessés. Le facteur de réduction pris en compte est voisin de 0,25.

### **4.2.6 Risques pour les travailleurs lors des opérations de manutention en surface au départ de StocaMine (chargement à StocaMine) et lors du déchargement à l'entrée des sites de Heilbronn, Herfa-Neurode ou Drambon (tous les scénarios sauf le scénario A).**

Ce risque est évalué à partir de la charge de travail estimée (4 personnes.an au chargement, idem au déchargement) et de l'accidentologie de ce type d'activité (statistiques d'accidents de travail INRS 2010).

#### **4.2.7 Risques pour les travailleurs lors du restockage des déchets à Heilbronn, Herfa-Neurode ou à Drambon (tous les scénarios sauf le scénario A)**

Pour le restockage à Heilbronn ou Herfa-Neurode, le calcul est réalisé sur des bases identiques à celles des opérations de déstockage à StocaMine en considérant une charge de travail correspondante réduite dans un facteur 1 pour 4 (cf. valeurs précédentes). Cette hypothèse tient compte du fait que ces sites sont toujours en activité, disposent en permanence de l'ensemble des moyens et équipements et que les ouvrages souterrains sont maintenus en bon état. En résumé, on a considéré que le stockage sur ce site nécessiterait 4 fois moins d'unités de main d'œuvre que le déstockage sur le site de StocaMine.

Pour le restockage à Drambon, le calcul a été fait en prenant en compte :

- une charge de travail de 12 850 heures, soit 7,3 personnes.an (source : estimations de l'exploitant du site) pour la masse de déchets dangereux ;
- l'accidentologie (léthalité, incapacité temporaire et incapacité permanente) du BTP pour l'année 2009.

#### **4.2.8 Risques lié au transport routier des déchets vers les sites de Heilbronn, Herfa-Neurode et/ou Drambon (travailleurs et populations exposées, biodiversité) (tous les scénarios sauf le scénario A)**

Le calcul intègre les composantes suivantes :

- le risque routier proprement dit (risque d'accidents liés à la circulation et ses conséquences : létalité et incapacité permanente des chauffeurs routiers et usagers de la route) ;
- le risque sanitaire sur les populations consécutif à un déversement de déchets dans l'environnement lors d'un accident routier ;
- le risque d'atteinte à la biodiversité dans les mêmes circonstances.

Le premier risque (risque routier) est basé sur le kilométrage total à parcourir par les camions (charge de 20 tonnes ; distances unitaires de 279 km, 475 km et 200 km respectivement vers les sites de Heilbronn, Herfa-Neurode et Drambon) et les statistiques d'accidents de circulation spécifiques du transport des matières dangereuses (dernières données du ministère chargé des transports pour 1997-1998, exprimées en fréquence par tonne transportée).

Le second type de risque (risque sanitaire et risque environnemental liés à un déversement) est basé sur :

- le kilométrage total à parcourir par les camions ;
- la probabilité de survenue d'un accident routier (source déjà indiquée) ;
- un scénario d'accident conduisant à la production d'une quantité unitaire de polluant, la quantité unitaire étant pondérée par les probabilités linéiques respectives de déversement au sol et dans l'eau ;
- des densités de population sur le parcours (fourchettes hautes et basses issues de statistiques INSEE).



Le scénario d'un accident routier pour un camion de 20 tonnes a fait l'objet d'une modélisation par l'INERIS. Parmi les substances toxiques (toxicité aigüe) présentes dans les déchets, c'est l'arsenic, sous forme de trioxyde d'arsenic ( $As_2O_3$ ) qui a été pris en compte du fait de sa proportion dans les déchets et de sa toxicité intrinsèque.

Deux cas ont été examinés :

- un accident sur un pont avec chute de big-bags dans une rivière pour lequel il a été pris en compte les effets à long terme ;
- un cas avec chute et éventrement d'un big-bag (contenant 640 kg de déchets considérés entièrement pulvérulents) sur la route pour lequel on cumule des effets aigus et des effets à long terme.

Il a été pris comme hypothèse que la chute et l'éventrement d'un big-bag générerait un envol de poussières d'environ 13 kg (2 % de 640 kg), dont la moitié en dispersion immédiate et l'autre en dispersion pendant 1 heure ; le reste des déchets épandus est considéré comme récupéré après l'accident.

La modélisation réalisée pour la dispersion aérienne des déchets a permis de déterminer les distances d'effet basées sur le seuil des effets létaux à 1 % (1 % de mortalité parmi les personnes exposées) et le seuil des effets irréversibles à 1 % (1 % des personnes exposées est touchée), soit environ 400 m et 700 m respectivement. Ces données et celles indiquées ci-dessus ont ensuite permis d'estimer l'impact à court terme sur la population présente à l'intérieur des zones d'effet.

Les quantités de substances toxiques dispersées lors d'un accident ont également été utilisées dans le modèle multimédia Impact 2002+ pour estimer les impacts sanitaires globaux (à long terme).

Les mêmes types de calcul sont opérés pour l'atteinte à la biodiversité exprimés en PDF.m<sup>2</sup>.an.



## **5. RÉSULTATS DE LA COMPARAISON - COMMENTAIRES**

Rappelons que cette comparaison ne prend en compte que les risques sanitaires (population générale et travailleurs) et environnementaux, à court et long termes (voir 2.1 et 2.2) ; elle exclut donc de la comparaison les autres risques (changement climatique, ressources...) ainsi que les coûts.

Il convient de préciser que, dans cette comparaison, la totalité des déchets solubles présents au sein du stockage (terme source) a été considérée comme mobilisable et transportée, sous l'effet du mécanisme de fluage du sel, vers l'extérieur, à long terme. Ce raisonnement provient :

- de l'hypothèse d'ennoyage, inéluctable à terme, de tout site de stockage en milieu salin ;
- de la prise en compte du phénomène de fermeture progressive et in fine totale des vides miniers sous l'effet du fluage du sel, donc d'expulsion lente de la saumure polluée au contact des déchets ;
- du comportement des principales substances toxiques en présence de saumure ;
- de la masse des substances toxiques dans les déchets de StocaMine.

Soulignons, en outre, que l'hypothèse adoptée quant au transport vers l'extérieur de la totalité des déchets solubles conduit à majorer l'impact des déchets.

Rappelons enfin que la comparaison des différents scénarios est fondée sur la seule masse des déchets disponibles à StocaMine et non, bien évidemment, sur la totalité des déchets disponibles à terme dans les sites récepteurs.

Les résultats de cette comparaison des scénarios ont été exposés au COPIL lors des présentations du 1<sup>er</sup> avril [58e] et, de manière plus complète, du 23 mai 2011 [58f]. Chaque indicateur est figuré sous forme d'un diagramme. Chacune des barres y représente un scénario...Une couleur différente a été affectée à chacun des risques « élémentaires » pour que l'on puisse en apprécier la contribution individuelle de chaque étape ou groupe d'étapes dans la valeur globale des indicateurs. L'absence apparente de couleur ne signifie pas que le risque soit absent ou non intégré mais traduit simplement que sa valeur est faible par rapport aux autres à l'échelle globale de la représentation.

Les résultats sont disponibles dans les références [58e] et [58f] et sont rappelés sur les figures qui suivent (Figure 13 et Figure 14).

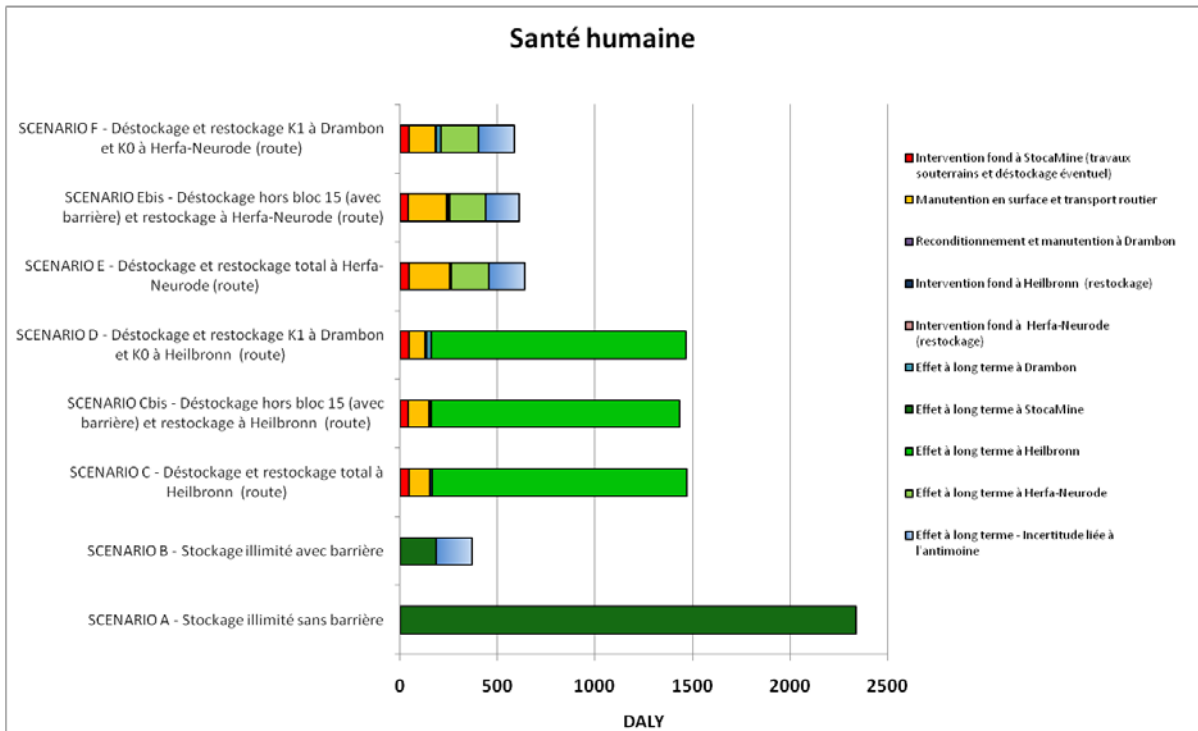


Figure 13 - Comparaison des scénarios du point de vue de leur impact sur la santé humaine

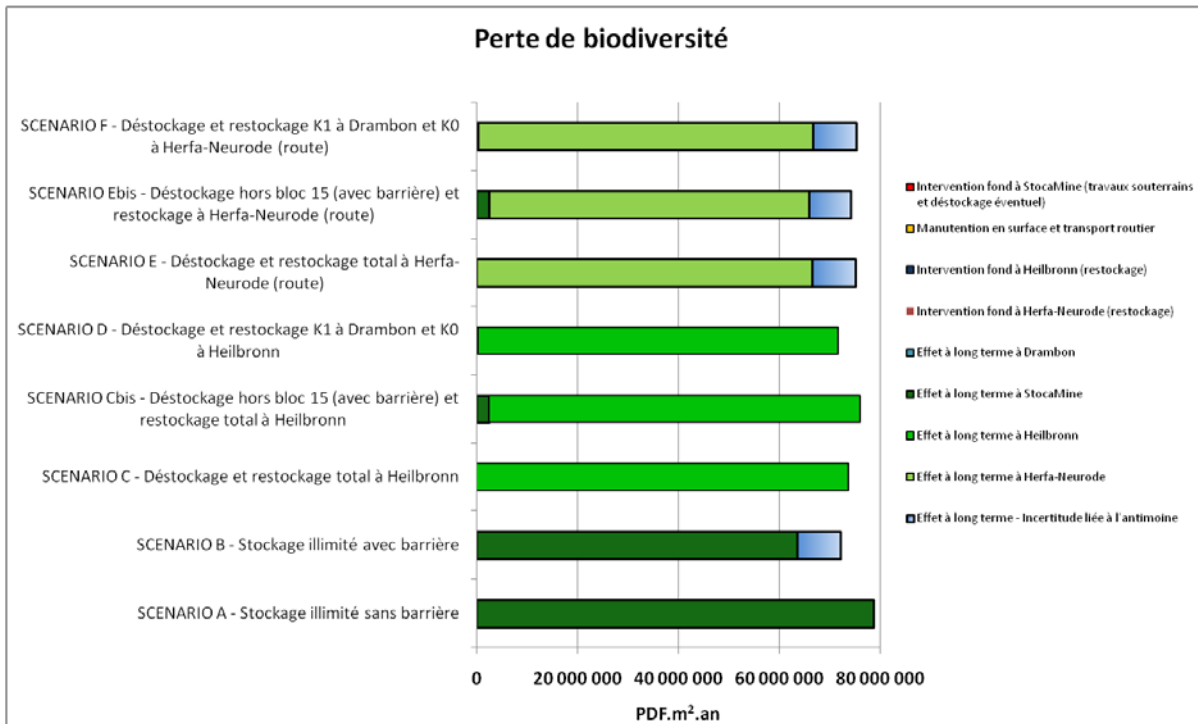


Figure 14 - Comparaison des scénarios du point de vue de leur impact sur la biodiversité

Tout d'abord, il faut signaler que les scénarios B, E, Ebis, et F font apparaître une barre relative à l'incertitude résultant du comportement de l'antimoine. Compte tenu des phénomènes de complexation, cette incertitude porte sur l'apparition possible ou non, dans le milieu alcalin dans lequel baigneraient les déchets, d'une forme de l'antimoine tétravalente Sb(IV). Or contrairement aux formes trivalentes, Sb(III), et pentavalente, Sb(V), 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. Cette dernière forme est considérée comme plus toxique, car susceptible d'interagir plus facilement avec les systèmes biologiques. L'incertitude matérialisée correspond donc au cas le plus défavorable. Elle n'impacte toutefois pas la hiérarchie des scénarios.

Hormis cette remarque, ces résultats permettent différents constats. Ils ont vocation à permettre le choix du scénario à mettre en œuvre et les orientations d'amélioration de tel ou tel scénario.

Les principales conclusions ressortant de la comparaison sont les suivantes :

- l'impact sur l'environnement, exprimé en perte potentielle de biodiversité (PDF.m<sup>2</sup>.an), n'est pas discriminant pour les scénarios étudiés et il ne permet pas de faire apparaître des résultats tranchés entre les différents scénarios ;
- à l'inverse, l'indicateur d'impact sur la santé humaine donne des résultats contrastés qui permettent de hiérarchiser les différents scénarios ;
- en ce qui concerne l'impact sur la santé humaine, 4 scénarios sont sensiblement plus impactants que les autres : StocaMine sans barrières ouvragées (scénario A) et les 3 scénarios concernant le site d'Heilbronn (scénarios C, Cbis et D). C'est principalement l'effet à long terme qui pénalise ces scénarios car les masses de polluants rejetées vers l'environnement y seraient plus importantes ;
- les scénarios les moins impactants pour la santé humaine sont StocaMine avec barrières ouvragées (scénario B) et les 3 scénarios relatifs à Herfa-Neurode (scénarios E, Ebis et F). Ces trois derniers ne se différencient principalement du premier que par les interventions supplémentaires nécessaires à la manutention et au transport des déchets sur une longue distance du site StocaMine vers le site récepteur ;
- l'indice global sur la santé humaine est peu impacté par les interventions nécessaires à la réalisation des barrières ouvragées à StocaMine (2 à 4 %) ; il faut ajouter que des interventions de même nature devraient logiquement s'appliquer aussi aux autres sites ;
- le scénario Herfa-Neurode (scénario E) et ses variantes (scénarios E, Ebis et F) présentent des impacts à long terme du même ordre de grandeur que StocaMine avec barrières (scénario B) ;

- le stockage des déchets dangereux sur le site de Drambon (scénario F) n'amène pas de différence significative avec le restockage total à Herfa-Neurode (scénario E) hormis une réduction de la part d'impact due au transport, ce site étant beaucoup plus proche de StocaMine (200 km contre 475 km). Toutefois, l'impact à long terme des déchets stockés à Drambon n'est pas très important car, pour être autorisés, ils doivent être inertés, ce qui réduit leur capacité de relargage ;
- enfin, d'une manière générale pour les 4 scénarios les moins impactants, l'impact pour la santé humaine résulte majoritairement des rejets de mercure vers l'environnement. Ceci provient de la toxicité élevée de cette substance et de son comportement particulier : il ne précipite pas dans les conditions géochimiques du milieu ; cet élément essentiel peut être utile dans le cadre de l'amélioration du scénario final.

De la comparaison effectuée, il ressort, avec les limites liées à ce type de méthode, que le scénario « StocaMine avec barrières ouvragées » (scénario B) est celui qui présente l'impact le plus faible à court et moyen termes sur la santé humaine (population générale et travailleurs) ; par ailleurs, son impact sur la biodiversité est similaire à celui des autres scénarios.

Si ce scénario était retenu, il conviendrait d'en affiner les impacts en termes de toxicité, notamment sous l'angle du respect des valeurs réglementaires ; sur la base des résultats obtenus, il serait nécessaire de développer des moyens de maîtrise du risque pour diminuer, réduire ou supprimer les effets sur l'environnement et la santé humaine.

Enfin, il est à noter que l'analyse des données sur les déchets de StocaMine, réalisée par l'INERIS a permis, préalablement à la comparaison, de réduire sensiblement la marge d'incertitude sur les masses moyennes des différents éléments présents. Toutefois, du fait de la méthode d'analyse semi-quantitative mise en œuvre par StocaMine, ces valeurs moyennes demeurent affectées par une marge d'incertitude encore significative, estimée à  $\pm 50\%$  de la valeur moyenne de la masse de chaque substance. Cette incertitude affecte, dans le calcul des indicateurs, les parts relatives aux effets à long terme. Celles-ci seraient toutes modifiées proportionnellement à la masse effective de substances. De ce fait, cette incertitude ne modifie pas qualitativement la hiérarchie des scénarios comparés. La conclusion de cette étude reste donc valable.

## 6. SYNTHÈSE

Dans le dossier de demande d'autorisation de stockage illimité selon le décret 2006-283 de mars 2006 que StocaMine, exploitant le site souterrain de stockage de déchets ultimes situé dans les formations salifères à Wittelsheim (Haut-Rhin), souhaite élaborer, il doit inclure « *Un exposé des solutions alternatives au maintien du stockage avec leurs conséquences respectives et indiquant les motifs pour lesquels le projet présenté a été retenu* » (Art. 2).

A la demande de StocaMine, l'INERIS a recherché et mis en œuvre une méthodologie permettant d'agrèger ou d'additionner des impacts sanitaires et environnementaux en autorisant le rapprochement d'informations de natures différentes :

- risques sanitaires (population générale et travailleurs),
- risques accidentels,
- risques pour l'environnement,

que ces risques soient aigus et chroniques, à court et long termes.

Dans cette approche, les impacts sur le changement climatique, les ressources naturelles et les coûts n'ont pas été pris en compte. De même, la méthodologie utilisée n'est pas destinée à prendre en compte les aspects réglementaires, sanitaires ou environnementaux contraints par des valeurs limites, guides ou autorisées. Elle est fondée sur le fait qu'une masse de substance dispersée dans l'environnement produit des effets sanitaires ou environnementaux qui peuvent être traduits en indicateurs globaux de risques.

De plus, la méthodologie retenue permet d'évaluer de manière homogène et simple la valeur des indicateurs globaux de risque pour chacun des scénarios examinés, donc de les situer les uns par rapport aux autres et de bien identifier celui qui présente les risques cumulés les plus faibles. Une fois cette démarche réalisée, le scénario choisi doit être examiné en prenant en compte les contraintes réglementaires, sanitaires et environnementales en cherchant à minimiser les risques au travers de la mise en place de Moyens de Maîtrise du Risque (MMR).

La démarche mise en œuvre s'est inspirée des méthodes d'Analyse du Cycle de Vie (ACV) et donc des normes NF-EN-ISO-14040 et 14044 d'octobre 2006. Ces méthodes d'évaluation du risque existent en mode opérationnel et sont publiées dans la littérature scientifique internationale. Elles permettent, après simplification et homogénéisation des données et informations, parfois hétérogènes en qualité et quantité ou de natures différentes, de les traiter et de les collationner. Enfin, la méthodologie facilite la comparaison des scénarios par l'utilisation d'indicateurs globaux de risque.

Les indicateurs globaux employés sont ceux adoptés par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) tant sur la plan sanitaire qu'environnemental ; ce sont :



- la DALY (Disabled-Adjusted-Life-Year) pour l'impact sur la santé humaine. Cet indicateur se traduit par « Année de vie corrigée de l'incapacité » (on trouve aussi « années de vie ajustées aux handicaps »). Il cumule les décès et incapacité, temporaire ou permanente, que l'origine en soit accidentelle ou non ;
- le PDF.m<sup>2</sup>.an (Potentially Disappeared Fraction traduit par fraction d'espèces affectée et/ou disparue) qui représente, pour l'impact sur la biodiversité, la fraction d'espèces potentiellement disparue sur une surface de 1 m<sup>2</sup> pendant 1 an.

La méthodologie de comparaison adoptée et les indicateurs globaux de risque fixés, les différents scénarios ont été développés. La démarche adoptée a consisté en une analyse des scénarios extrêmes (déstockage total et stockage illimité), avec plusieurs variantes.

Huit scénarios ont ainsi été retenus et comparés :

- 2 pour le stockage illimité à StocaMine ; il s'agit de deux variantes, sans et avec mise en place de barrières ouvragées (scénarios A et B) ;
- 2 pour le déstockage total, les sites de destination étudiés ont été les sites souterrains allemands d'Heilbronn (scénario C) et de Herfa-Neurode (scénario E), anciennes mines de sel autorisés à recevoir les déchets de StocaMine ;
- 2 variantes des précédents : déstockage total et restockage en sites allemands pour les déchets ultimes ainsi que sur le site de surface de Drambon pour les déchets dangereux (scénarios D et F) ;
- 2 autres variantes enfin, pour le déstockage total et le restockage en sites allemands, à l'exception des déchets du bloc 15 laissés en place (scénarios Cbis et Ebis).

Les données utilisées pour analyser ces 8 scénarios sont issues des études réalisées préalablement à l'intervention de l'INERIS mais complétées pour que l'analyse soit aussi exhaustive que possible (comportement minier, comportement hydrogéologique, terme source, transport...).

Les étapes majeures identifiées dans ces scénarios ont rassemblé plusieurs tâches unitaires qui présentent des impacts ou risques pouvant être analysés de manière homogène comme :

- l'entretien minier ;
- les travaux d'édification des barrages et travaux connexes ;
- le reconditionnement et le transport jusqu'en surface ;
- le transport vers le lieu de stockage identifié ;
- le restockage dans le nouveau site.

Les types de risques associés à ces tâches sont :

- le risque minier, spécifique au contexte dans lequel le stockage se situe ;

- le risque mécanique (risque de dommage corporel sur les travailleurs), quelle que soit l'étape considérée (travaux de réalisation de barrières, déstockage, transport, restockage) ;
- le risque physico-chimique, consécutif à l'exposition des travailleurs aux substances chimiques contenues dans les déchets, également quelle que soit l'étape ;
- le risque de pollution accidentelle apparaissant lors des manipulations dans la mine (air extérieur) ou lors du transport d'un site à l'autre (air, cours d'eau, nappe, sol) ;
- le risque de remobilisation et transfert de polluants vers la nappe, l'air, les eaux de surface et ses implications (irrigation, consommation, contact).

A partir de tous ces éléments, les indicateurs globaux de risque ont été calculés pour chacun des scénarios examinés grâce à :

- une phase d'inventaire de toutes les étapes du scénario considéré ;
- dans chacune de ces étapes, une identification et une quantification des impacts potentiels ;
- et, pour chacun de ces impacts, l'évaluation du (ou des) valeur(s) des parts des indicateurs qui en découlent. A noter que certains impacts peuvent s'adresser à plusieurs catégories ; par exemple, une substance peut être toxique pour l'homme et donc contribuer à l'indicateur en DALY et également impacter la biodiversité et alors contribuer à l'indicateur en PDF.m<sup>2</sup>.an.

Ces indicateurs ont été évalués, selon la nature et le type des données, par l'une des deux méthodes suivantes :

- soit sur la base de statistiques d'accidentologie (CdF, BTP, INRS...) et de durées d'exposition (en personnes.an pour les travaux, par modélisation en cas d'accident routier...) ;
- soit par modélisation globale des effets des substances en utilisant un modèle intégrateur dit « de compartiment » (aquatique et terrestre) à l'échelle spatiale européenne sans notion de temps (modèle IMPACT 2002+ développé par l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne). S'agissant du risque sanitaire, ce modèle intègre les effets sur toutes les personnes exposées, travailleurs comme population générale.

Il ressort de la comparaison des différents scénarios de devenir des déchets de StocaMine que le scénario « StocaMine avec barrières » est celui présentant, par cette analyse, les impacts totaux, à court et long termes, les plus faibles.

S'il est retenu, ce scénario, doit être examiné de manière approfondie dans l'objectif de réduire autant que possible l'impact des déchets sur l'homme et la biosphère, en particulier la nappe d'Alsace.



## **7. RÉFÉRENCES**

***Les références citées ci-dessous sont celles du dossier global de demande de prolongation de stockage illimité dont ce rapport constitue une des pièces. La numérotation générale a été conservée par souci de cohérence et de simplification.***

- [1] Le stockage en mine de déchets industriels, StocaMine, février 1996.
- [2] Etude de sûreté d'un projet de stockage de déchets toxiques dans la Mine Amélie. Aspects mécaniques du problème, G. Vouille, Ecole des Mines de Paris, document non daté (antérieur à février 1997).
- [3] Estimation des mouvements sismiques à la cote 500 m, Institut de physique du globe de Strasbourg, document non daté (antérieur à février 1997).
- [4] Etude de sûreté d'un projet de stockage de déchets toxiques dans la Mine Amélie. Approche des problèmes liés à l'hydrologie, P. Combes, E. Ledoux, Ecole des Mines de Paris, document non daté (antérieur à février 1997).
- [5] Stockage profond : évaluation des flux de déchets admissibles, Agence Nationale pour la Récupération et l'Élimination des Déchets (ANRED), juillet 1990.
- [6] Stockage profond de déchets industriels : étude des dangers, Projet Etudes Conseils Services, Industrie Environnement (PECSIE), 27 mars 1991.
- [7] Mines de Potasse d'Alsace : tenue au séisme du cuvelage du puits Joseph, Electricité de France, 11 mars 1991.
- [8] Etude de sécurité chimique, J. Muller, G. Kille, Ecole Nationale Supérieure de Chimie de Mulhouse, 30 novembre 1990.
- [9] Etude de sécurité chimique sur le projet MDPA de stockage profond des déchets industriels dans la mine Joseph-Else à Wittelsheim, Comportement à long terme, G. Kille, S. Walter, Ecole Nationale Supérieure de Chimie de Mulhouse, document non daté.
- [10] Stockage en mine de déchets toxiques : déchets à exclure, Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques (INERIS), 14 septembre 1993.
- [11] Stockage en mine de déchets toxiques : déchets à exclure, INERIS, 21 septembre 1993.
- [12] Etude de sécurité chimique, procédure d'acceptation et de suivi des déchets, Ecole Nationale Supérieure de Chimie de Mulhouse, 21 janvier 1991.
- [13] Avis d'expert relatif à la demande de création d'un stockage souterrain de déchets industriels ultimes, INERIS, octobre 1996.
- [14] Réalisation d'un état initial du site de stockage de déchets industriels de StocaMine, INSA division Polden, décembre 1998.
- [15a] Etude du comportement hydraulique de l'obturation d'un puits par un bouchon de cendres volantes, étude bibliographique, INERIS, 21 décembre 2001.
- [15b] Etude du comportement hydraulique de l'obturation d'un puits par un bouchon de cendres volantes, synthèse (Projet), INERIS, 15 octobre 2002.

- [16a] Evaluation des risques sanitaires : site de Wittelsheim, bilan des émissions au jour et en fond de mine, ERM France, 20 février 2003.
- [16b] Evaluation des risques sanitaires : site de Wittelsheim, ERM France, 30 mars 2003.
- [17] StocaMine : rapport final d'expertise, Experts nommés par la Commission Locale d'Information et de Surveillance (CLIS), 24 juillet 2003.
- [18] Audit triennal de StocaMine, 1999-2002, INERIS, septembre 2003
- [19] Suivi des lots, StocaMine, février 1999 à septembre 2002.
- [20] Analyses environnementales courantes, extraits, StocaMine.
- [21] Suivi minier, température et analyses des gaz, StocaMine et MDPA.
- [22] Arrêtés préfectoraux du 3.2.1997, 10.7.2001, 12.9.2002, 17.12.2002, Préfecture du Haut-Rhin.
- [23] Rapport d'activité, StocaMine, décembre 1999 à décembre 2002.
- [24] Manuel Qualité / Environnement, StocaMine 2 juillet 2002.
- [25] Plan des travaux du fond et aérage, MDPA
- [26] Affaissement et dégâts de surface dans le bassin potassique alsacien, MDPA, 7 juillet 1999 et juillet 2007.
- [27] Caractérisation des cendres volantes, MDPA, 30 mars 2004.
- [28] Etude géologique, hydrogéologique et géotechnique du centre de stockage de StocaMine, Wittelsheim (Haut Rhin), MICA Environnement, avril 2004.
- [29] Détermination des dangers, Institut Suisse pour la Promotion de la Sécurité, juillet 2004.
- [30] Stockage souterrain de Wittelsheim : évaluation des risques suite au confinement de déchets dans la mine. Risques dus aux substances chimiques, BMG Engineering AG, juillet 2004.
- [31] Etude d'impact, rapport synthèse, Institut Suisse pour la Promotion de la Sécurité, juillet 2004.
- [32] Etude de sécurité au travail et de protection de la santé dans le cadre de la mise en œuvre de la réversibilité, Institut Suisse de Promotion de la Sécurité, juin 2006.
- [33] Rapport de synthèse Etude approfondie de la variante de la mise en œuvre de la réversibilité, Institut Suisse de Promotion de la Sécurité, juin 2006.
- [34] Stockage souterrain de Wittelsheim : évaluation technique de la variante de la mise en œuvre de la réversibilité, BMG Engineering AG, juin 2006.
- [35] Actualisation de l'étude de stabilité du stockage de déchets toxiques dans la mine d'Amélie, F. Hadj-Hassen, M. Tijani, Ecole des Mines de Paris, Février 2006
- [36] Etude technique détaillée du confinement complémentaire du bloc 15, STOCAMINE, SOLETANCHE-BACHY juillet 2006

- [37] Synthèse sur l'ennoyage de la mine de potasse Secteur Ouest, CESAME, Septembre 2006
- [38] Plan d'Urgence Interne, STOCAMINE
- [39] CESAME (2008). L'ennoyage des mines de potasse. Dossier commun aux secteurs Est et Ouest. Rapport AB/1143/04/08, avril 2008, 80 p
- [40]: ERCOSPLAN (2008). Etude de faisabilité. Remblayage des cavités souterraines de Stockage des Déchets de StocaMine, Wittelsheim/France. Rapport ERCOSPLAN. EGB 07-042. 02 septembre 2008, 75 p.
- [41] GEOSTOCK (2008). MDPA – Projets puits – Puits piézométrique – Puits d'évent. Programme simplifié – DIV/F/J/0003 –18/03/2008, 27p.
- [42] MDPA (2008) – Mémoires techniques des Mines de Potasse d'Alsace – 1904-2008 – octobre 2008, 1068 p
- [43] MDPA-SA (2003). Les sondages depuis ce jour à l'intérieur des concessions MDPA. Rapport 58/03-XE, Etudes générales, 19/11/2003, 8 p. + annexe.
- [44] Modes opératoires du laboratoire de StocaMine – LAB-MO-02 à 15 – 01/06/2000
- [45] MDPA – Document Santé Sécurité - 23/06/2008 – 73p
- [46] StocaMine – Le devenir du stockage souterrain de StocaMine – Mai 2009
- [47] HADJ-HASSEN F. (2009). STOCAMINE. Evaluation du volume des vides souterrains résiduels après ennoyage du stockage. Rapport Mines ParisTech, octobre 2009, 13 p.
- [48] AVEC (2009) - Etude des conséquences sur l'aérage d'un incendie dans la voie de roulage près du bloc 14 du secteur StocaMine et dans la galerie Vam AJF2D du secteur MDPA – 13/08/2009 – 28p
- [49] FEUGA B. (2010) - Comparaison entre les conditions d'isolement des déchets dans le site de stockage de StocaMine et dans quelques sites allemands de stockage en mines de sel ou de potasse – 03/2010 – 94p
- [50] GOMBERT P. - Stockage souterrain de StocaMine (68). Synthèse critique des études hydrogéologiques sur l'ennoyage du site – INERIS-DRS-10-108130-03801A – Mars 2010
- [51] GHOREYCHI M. - Analyse critique des études géomécaniques du stockage de StocaMine – INERIS-DRS-10-108130-04240A – Avril 2010
- [52] 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
- [53] GHOREYCHI M. - Etude géomécanique du stockage de StocaMine – INERIS-DRS10-108130-14273A – Décembre 2010
- [54] 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

- [55] GOMBERT P. - Stockage souterrain de StocaMine (68) - Etude hydrogéologique de l'ennoyage du site – INERIS-DRS-10-108130-12810B – Mars 2011
- [56] 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
- [57] 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
- [58] Présentations faites au COPIL les 19 novembre 2010 [58a], 9 décembre 2010 [58b], 20 janvier 2011 [58c], 28 février 2011 [58d], 1er avril 2011 [58e], 23 mai 2011 [58f] – Disponibles aussi sur <http://www.stocamine.com>
- [59] Comité de Pilotage StocaMine – Rapport d'expertise – Juillet 2011
- [60] Comité de Pilotage StocaMine – Présentation à la CLIS - 7 Juillet 2011
- [61] FNADE (Fédération Nationale des Activités du Déchet et de l'Environnement) - Analyse du Cycle de Vie de la filière de Stockage des Déchets Industriels Spéciaux Ultimes – Bio Intelligence Service - Rapport final après revue critique – Décembre 2002
- [62] AMRAOUI N., BUSCARLET E. et THIERY D. Modélisation d'une fuite de saumure à partir du site de stockage souterrain de StocaMine : simulation d'un 5<sup>ème</sup> Scénario. Rapport BRGM/RP-60256-FR – Octobre 2011
- [63] ERCOSPLAN - Conceptual Design Backfill Operation and Dam Construction of StocaMine Toxic Waste Disposal Site - EGB 07-042N01 – Draft – Juin 2011
- [64] ERCOSPLAN - Opérations de Remblaiement et d'Isolation du Site de Stockage de Déchets Ultimes StocaMine – Etude de conception – Résultats préliminaires – Juin 2011
- [65] QUANTIS Canada - Description de la méthodologie ACV (Analyse du Cycle de Vie) – Annexe explicative jointe aux rapports d'application de l'Analyse de Cycle de Vie
- [66] HUMBERT S., MARGNI M., JOLLIET O. - IMPACT 2002+:- Methodology Description - Draft for version 2.1 – February 2009
- [67] 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
- [68] PINTE J.C. - Comparaison des scénarios de devenir du stockage de StocaMine - INERIS – DRS-12-108130-00756B – Janvier 2012
- [69] 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
- [70] LIBERDA R. – Choix d'un site de forage de reconnaissance de la montée des eaux – MDPA- Direction Technique – 146-11 DT-RL – Janvier 2012

[71] 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



RAPPORT D'ÉTUDE  
DRS-13-141706-11148A

25/11/2013

**Comparaison des scénarios relatifs au  
devenir du stockage de StocaMine - Etude  
complémentaire**



# **Comparaison des scénarios relatifs au devenir du stockage de StocaMine - Etude complémentaire**

**Direction des Risques du Sol et du Sous-sol**

**StocaMine**



## PREAMBULE

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

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

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

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

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

	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	Jean-Claude PINTE	Christian TAUZIEDE	Mehdi GHOREYCHI
Qualité	Ingénieur à la Direction des Risques du Sol et du Sous-sol	Secrétaire Général	Directeur des Risques du Sol et du Sous-sol
Visa			

## Table des matières

<b>1. CONTEXTE ET OBJECTIF .....</b>	<b>5</b>
<b>2. RAPPEL DE LA MÉTHODOLOGIE DE COMPARAISON DES SCÉNARIOS.</b>	<b>7</b>
2.1 Impacts et risques pris en compte.....	8
2.2 Périmètre de l'étude.....	9
2.3 Indicateur global d'impacts sur la santé humaine et mode d'obtention .....	11
<b>3. PROBLÉMATIQUE ET SCÉNARIOS.....</b>	<b>15</b>
<b>3. PROBLÉMATIQUE ET SCÉNARIOS.....</b>	<b>15</b>
3.1 Partie des scénarios relative au déstockage-transport-restockage.....	15
3.2 Partie des scénarios relative au stockage illimité .....	19
<b>4. RÉSULTATS DE L'ÉTUDE DE COMPARAISON - COMMENTAIRES.....</b>	<b>21</b>
<b>5. SYNTHÈSE.....</b>	<b>25</b>

## Figures

Figure 1 – Catégories d'impact ou de dommage et regroupés en 4 grandes catégories de dommages potentiellement pris en compte dans une ACV .....	8
Figure 2 – Périmètre de l'étude réduit à un seul site de restockage et un seul mode de transport .....	10
Figure 3 – Périmètre des stockages illimités .....	10
Figure 4 - Schéma conceptuel de fonctionnement du modèle IMPACT 2002+ pour un stockage souterrain de déchets .....	14
Figure 5 – Schéma conceptuel du déstockage-transport-restockage et risques associés	15
Figure 6 – Itinéraire entre Wittelsheim et Sondershausen (Mappy©) .....	17

## Tableaux

Tableau 1 - Risques globaux par scénarios et étapes.....	9
Tableau 2 – Type de risques par étapes et par scénario et mode d'estimation .....	13
Tableau 3 – Effectif des travailleurs affectés aux travaux de déstockage et durée des phases des scénarios selon les variantes .....	16
Tableau 4 – Exemple de calcul d'un effectif en personne.an d'une phase de scénario ....	17
Tableau 5 – Tableau des concentrations en g/l - rapport INERIS- DRC-13-140901-10732A .....	19



## **1. CONTEXTE ET OBJECTIF**

Depuis fin 2011, l'INERIS intervient dans les différentes études du stockage de déchets industriels de StocaMine. Le développement d'une méthodologie adaptée a permis de comparer en 2012, différents scénarios de retrait ou de stockage dans plusieurs sites. La présente étude s'inscrit dans le prolongement de l'étude 2012. En effet, StocaMine a sollicité l'INERIS pour compléter l'analyse de scénarios de déstockage des déchets entreposés à Wittelsheim par rapport aux scénarios étudiés en 2012. Ces scénarios sont les suivants :

- V1 – déstockage des déchets B3 et B5 des blocs 21 et 22 correspondant au déstockage de 56 % de la masse de mercure (évaluation StocaMine) ; c'est le scénario retenu pour le montage du dossier de demande de stockage illimité ;
- V2 - en complément du choix précédent, déstockage des déchets B3 et B5 des blocs 12 et 23, ou autrement dit les déchets B3 et B5 des blocs 12, 21, 22 et 23, l'ensemble correspondant à 93 % de la masse de mercure (évaluation StocaMine) ;
- 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 ; il constitue une extension du scénario V1 ;
- V4 – déstockage de tous les déchets des blocs 12, 21, 22 et 23 ; il s'agit d'une extension du scénario V2 ;
- V5 – déstockage de tous les déchets, à l'exception ceux du bloc 15 dont l'accès est jugé trop dangereux pour les travailleurs.

La méthode d'évaluation de ces scénarios est conforme à celle mise en œuvre dans le rapport INERIS–DRS-13-141706-11148A de janvier 2012 dont nous rappelons les grands principes ci-après. Cependant, les valeurs d'indicateur obtenues ne sont pas comparables en l'état car, entre ces deux analyses, les hypothèses ont été affinées tant sur la connaissance de la quantité de substance contenue dans les déchets que sur la durée effective des travaux. Ce sont donc les données mises à jour qui ont permis cette nouvelle comparaison des scénarios dont on retiendra principalement que :

- tous comprennent à la fois une part de stockage illimité et une part de déstockage et restockage, donc des phases de travaux et de risques correspondantes, la différence entre les scénarios venant de la part déstockée-restockée ;

- le déstockage est effectué en direction de Sondershausen, site retenu dans le cadre d'un appel d'offres.

Enfin, l'étude précédente avait montré que l'indicateur environnemental global n'était pas discriminant pour la comparaison des scénarios ; la présente évaluation s'est donc limitée à celle de l'indicateur d'impact sur la santé humaine uniquement.



## **2. RAPPEL DE LA MÉTHODOLOGIE DE COMPARAISON DES SCÉNARIOS**

L'objectif de cette étude, qui s'appuie sur la méthodologie développée lors de l'étude menée en 2012, est d'évaluer les impacts sanitaires<sup>1</sup> en autorisant le rapprochement d'informations de natures différentes :

- risques sanitaires (population générale et travailleurs),
- risques accidentels,

que ces risques soient aigus ou chroniques, à court ou long terme. Le détail de la méthodologie est disponible dans le rapport INERIS–DRS-13-141706-11148A de janvier 2012 ainsi que sur les différentes présentations au COPIL sur le thème, accessibles sur le site de StocaMine.

Comme lors de l'étude précédente, les impacts sur le changement climatique, les ressources naturelles et les coûts n'ont pas été pris en compte. De même, la méthodologie utilisée n'est pas destinée à prendre en compte les aspects réglementaires, sanitaires ou environnementaux contraints par des valeurs limites, guides ou autorisées. Elle est fondée sur le fait qu'une masse de substance dispersée dans l'environnement produit des effets sanitaires qui peuvent être traduits dans un indicateur global de risques.

De plus, la méthodologie retenue permet d'évaluer de manière homogène et simple la valeur de l'indicateur global de risque pour chacun des scénarios examinés, donc de les situer les uns par rapport aux autres et de bien identifier celui qui présente les risques cumulés les plus faibles. Une fois cette démarche réalisée, le scénario choisi doit être examiné en prenant en compte les contraintes réglementaires, sanitaires et environnementales en cherchant à minimiser les risques au travers de la mise en place de Moyens de Maîtrise du Risque (MMR).

Comme indiqué préalablement, les études menées en 2012 ont montré que l'indicateur environnemental n'était pas discriminant pour le « classement » des scénarios. C'est pourquoi, dans cette évaluation, seul l'indicateur d'impact sur la santé humaine, indicateur global adopté par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), a été retenu. Il s'agit du DALY (Disabled-Adjusted-Life-Year). Cet indicateur se traduit par « Années de vie corrigée de l'incapacité » (on trouve aussi « années de vie ajustées aux handicaps »). Il cumule les décès et incapacité, temporaire ou permanente, que l'origine en soit accidentelle ou non.

---

<sup>1</sup> L'impact environnemental sur la biodiversité a été par ailleurs étudié en 2012 mais l'étude a montré qu'il n'était pas discriminant pour le choix des scénarios

## 2.1 IMPACTS ET RISQUES PRIS EN COMPTE

Les méthodes permettent de prendre en compte et analyser de nombreux types de risques ou impacts. La Figure 1 répertorie les différents types de risques et impacts que ce type de méthode peut traiter.

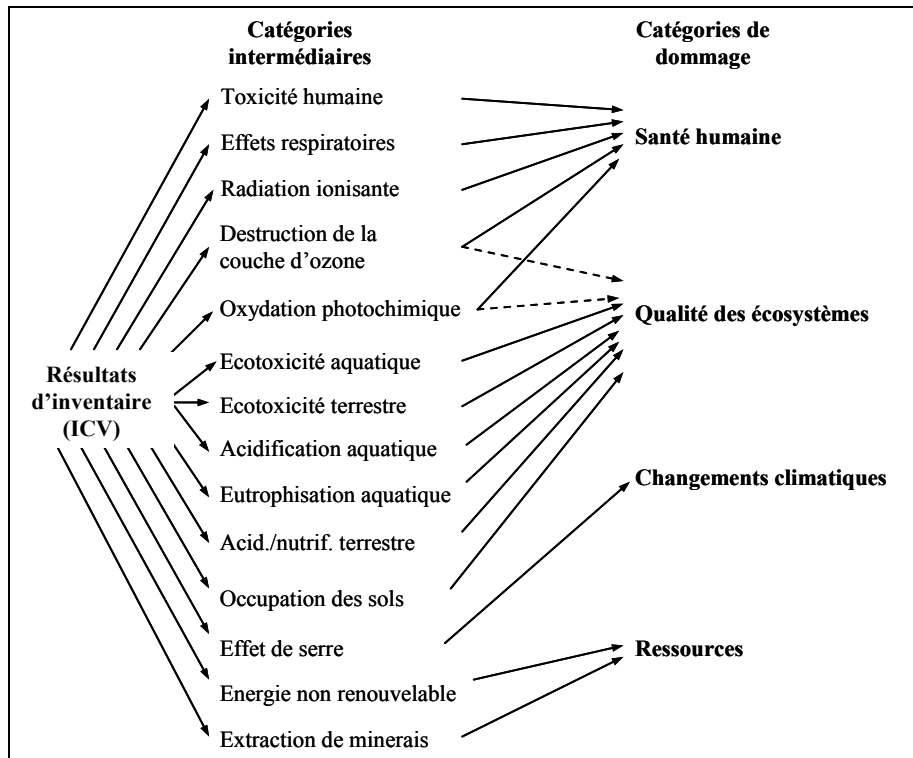


Figure 1 – Catégories d'impact ou de dommage et regroupés en 4 grandes catégories de dommages potentiellement pris en compte dans une ACV

Pour cette comparaison, seuls les impacts sanitaires sur les travailleurs et sur la population générale ont été retenus.

Les impacts et risques qui n'ont pas été pris en compte sont :

- les impacts sur le changement climatique ; c'est principalement le transport qui contribue à cet impact, au travers de l'émission de gaz à effet de serre ;
- les impacts sur la qualité de l'air ; comme le précédent, c'est le transport qui contribue à cet impact ;
- les impacts sur les ressources naturelles ; le transport classique (consommation d'énergie non renouvelable) contribue à cet impact ;
- les enjeux juridiques, financiers et sociopolitiques.

Pour chacun des scénarios retenus et pour chacune des grandes étapes de ces scénarios (indiquées dans le Tableau 1 ci-après), le travail a consisté à calculer la contribution de chacun des risques et impacts pris isolément à l'indicateur global.

Temporalité	Déstockage-restockage	Types de risque ou impact
Court terme	Interventions de stabilisation dans la mine	• Risque sanitaire par exposition des travailleurs sur site (risque physico-chimique). Concentration résiduelle ou émanation accidentelle
		• Risque de dommages corporels accidentels sur travailleurs (risque mécanique)
		• Risque minier spécifique
	Déstockage	• Risque de pollution accidentelle en raison des activités dans la mine (air extérieur)
		• Risques physico-chimique, mécanique et minier
	Transport	• Risque de pollution accidentelle (air, cours d'eau, sol, nappe)
		• Risque d'exposition de personnes directement impliquées (physico-chimique)
		• Risque de dommages corporels accidentels sur personnes impliquées (mécanique)
	Restockage	• Risque de pollution accidentelle en raison des activités dans le stockage souterrain allemand (air extérieur)
		• Risque de pollution accidentelle en raison des activités dans le stockage de surface
• Risques physico-chimique, mécanique, minier dans le site allemand		
Long terme	Gestion du site (surveillance, entretien pompes, suivi nappe...)	<i>(négligé – supposé de poids égal dans les 2 sites)</i>
	Fuite chronique	• Remobilisation de polluants vers la nappe à travers une faille, puis vers les eaux de surface (augmentation du bruit de fond de la contamination environnementale)
		• Remobilisation de polluants vers la nappe – contact direct par eau consommée ou irrigation
		• Diffusion de polluants vers l'air extérieur, e.g. via une faille
Evènement catastrophique	• Résurgence soudaine de polluants en surface (air, eau) e.g. séisme	

Tableau 1 - Risques globaux par scénarios et étapes

## 2.2 PÉRIMÈTRE DE L'ÉTUDE

Le périmètre de l'étude de comparaison qui était représenté sur le schéma conceptuel de la figure 4 du rapport précédent et qui concernait le scénario de déstockage est donc amputé de sa branche d'élimination en Installation de Stockage de Déchets dangereux (ISDd) en France puisque la part de déchets déstockée pour chaque scénario est prévue d'être restockée le site de Sondershausen en Allemagne. Il est donc réduit au périmètre présenté sur la Figure 2.

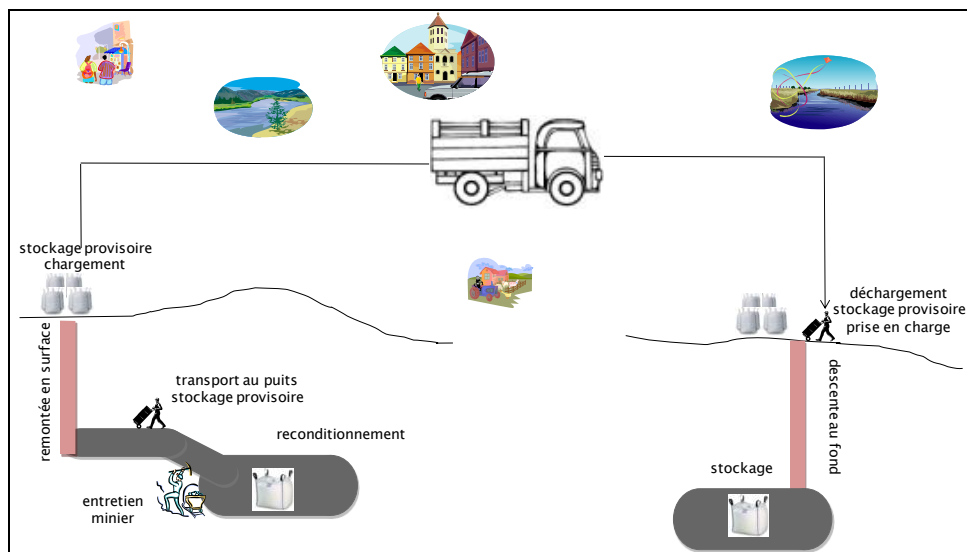


Figure 2 – Périmètre de l'étude réduit à un seul site de restockage et un seul mode de transport

Pour la part des scénarios relative aux stockages illimités, la figure 5 du rapport précédent synthétisait le périmètre « extérieur » d'un stockage ou restockage illimité, quel que soit le site retenu, auquel il fallait ajouter tous les travaux nécessaires à la fermeture-même du (des) site(s) ; ce périmètre est inchangé ici, même s'il est effectif sur les deux sites, Wittelsheim (StocaMine) et Sondershausen (Figure 3), puisque les deux sites constitueront des stockages illimités.

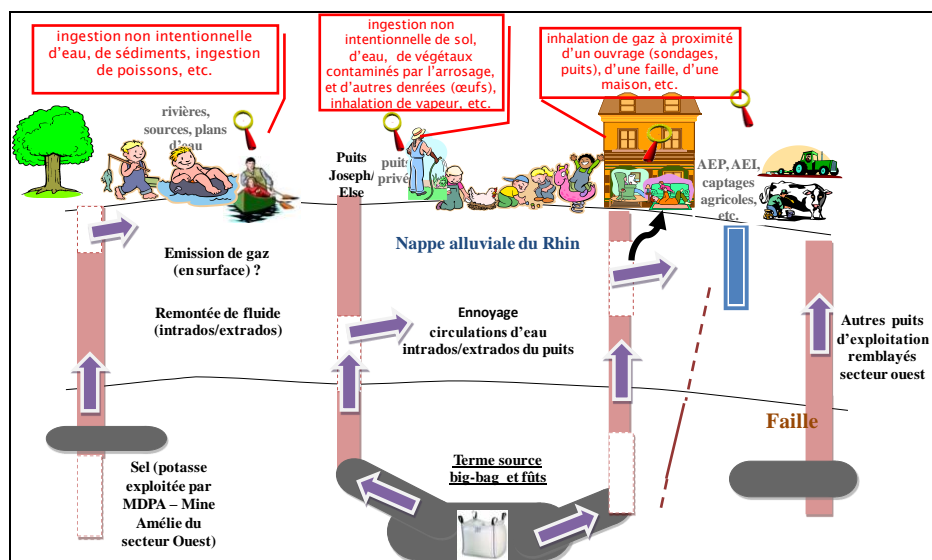


Figure 3 – Périmètre des stockages illimités

## 2.3 INDICATEUR GLOBAL D'IMPACTS SUR LA SANTÉ HUMAINE ET MODE D'OBTENTION

Il est possible de traduire les impacts sur la santé humaine, qu'ils soient létaux, aigus ou chroniques, à court ou long terme, qu'ils concernent les travailleurs intervenant sur les sites de stockage et/ou les déchets ou encore la population générale, sous forme d'un indicateur commun et donc d'additionner les contributions partielles de chaque étape de scénario.

Cet indicateur, DALY (Disabled-Adjusted-Life-Year), adopté par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), a été largement décrit dans le rapport de comparaison des scénarios précédent. On pourra s'y reporter pour en avoir une description plus détaillée. Rappelons que cet indicateur cumule les décès et incapacité, temporaire ou permanente, que l'origine en soit accidentelle ou non. Son utilisation est aujourd'hui consensuelle.

Cet indicateur a été évalué par deux approches selon la nature et le type des données :

- soit sur la base de statistiques d'accidentologie et de durées d'exposition des individus ;
- soit par une modélisation globale des effets des substances en utilisant un modèle intégrateur dit « de compartiment » (aquatique et terrestre) à l'échelle spatiale européenne et sans limitation de temps.

Le modèle utilisé pour la seconde approche est le modèle IMPACT 2002+ décrit ci-après.

Le Tableau 2 détaille le mode d'évaluation par étape et scénario. Le code couleur des cases de ce tableau traduit la méthode appliquée pour l'estimation du risque comme suit :

Estimation du risque basée sur des statistiques d'accidentologie et durée d'exposition
Estimation du risque par modélisation globale des effets des substances (IMPACT 2002)

Pour certaines étapes de scénario (en jaune sur le tableau), l'évaluation de l'impact sur la santé humaine s'est appuyée sur des données de statistiques d'accidentologie, que ce soit au travail ou durant le transport des déchets. La traduction en DALY s'est faite sur la base de données OMS (<http://apps.who.int/ghodata/>). Pour l'évaluation de cette part de l'indicateur il est donc nécessaire de connaître l'effectif des travailleurs affectés à chaque tâche et la durée de celles-ci.

Pour les autres étapes de scénario (en bleu sur le tableau), conduisant à des impacts diffus dans l'air, l'eau (souterraine ou de surface) ou les sols, sur la santé humaine, l'évaluation est fondée sur l'utilisation du modèle IMPACT 2002+ développé par l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (Suisse). Celui-ci a recours, comme données d'entrée, à des masses (cumulées dans le temps) des substances rejetées dans l'environnement. Celles-ci ont été obtenues à partir d'une actualisation de l'évaluation du terme source (INERIS-DRC-13-140901-10732A) et son impact sur la nappe, l'air et le sol.

Temporalité	Déstockage-restockage	Types de risque ou impact
Court terme	Interventions de stabilisation dans la mine	• Risque sanitaire par exposition des travailleurs sur site (risque physico-chimique). Concentration résiduelle ou émanation accidentelle
		• Risque de dommages corporels accidentels sur travailleurs (risque mécanique)
		• Risque minier spécifique
	Déstockage	• Risque de pollution accidentelle en raison des activités dans la mine (air extérieur)
		• Risques physico-chimique, mécanique et minier
	Transport	• Risque de pollution accidentelle (air, cours d'eau, sol, nappe)
		• Risque d'exposition de personnes directement impliquées (physico-chimique)
		• Risque de dommages corporels accidentels sur personnes impliquées (mécanique)
	Restockage	• Risque de pollution accidentelle en raison des activités dans le stockage souterrain allemand (air extérieur)
		• Risque de pollution accidentelle en raison des activités dans le stockage de surface
• Risques physico-chimique, mécanique, minier dans le site allemand		
Long terme	Gestion du site (surveillance, entretien pompes, suivi nappe...)	• (négligé – supposé de poids égal dans les 5 scénarios)
	Fuite chronique	• Remobilisation de polluants vers la nappe à travers une faille, puis vers les eaux de surface (augmentation du bruit de fond de la contamination environnementale)
		• Remobilisation de polluants vers la nappe – contact direct par eau consommée ou irrigation
		• Diffusion de polluants vers l'air extérieur, e.g. via une faille
Evènement catastrophique	• Résurgence soudaine de polluants en surface (air, eau) e.g. séisme	

Tableau 2 – Type de risques par étapes et par scénario et mode d'estimation

Le modèle « IMPACT 2002+ » applique ensuite à ces masses de substances ses propres facteurs de caractérisation, spécifiques de chaque substance, qui intègrent le devenir de la substance dans les différents compartiments de l'environnement, les modes d'exposition des individus, le potentiel de risque et la gravité des effets sur la santé humaine. Le modèle fournit ainsi des résultats directement exprimés en DALY.

Le schéma conceptuel de la Figure 4 illustre le fonctionnement du modèle IMPACT 2002+ en fonction des données fournies en entrée (flèche rouge) vers la nappe ou l'atmosphère. L'étendue spatiale sur laquelle la modélisation porte, représentée schématiquement par le tireté jaune sur la figure, recouvre l'ensemble du territoire sur lequel les substances rejetées dans l'environnement peuvent présenter un impact compte tenu des vecteurs concourant à leur dissémination. Le territoire considéré est a priori illimité, dépassant les échelles locale et régionale.

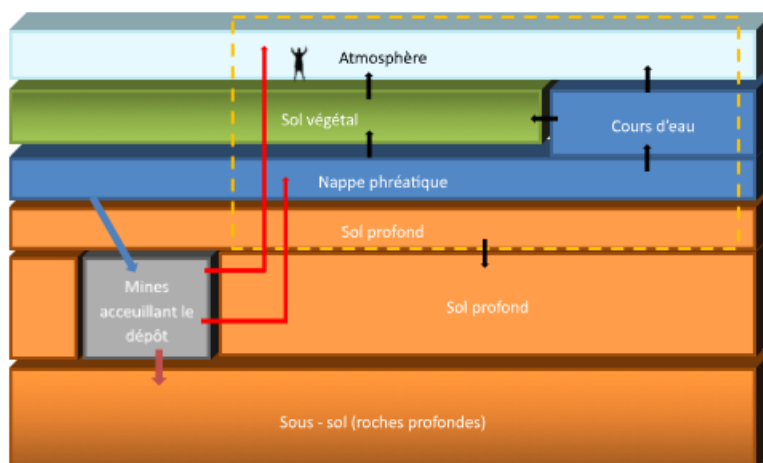


Figure 4 - Schéma conceptuel de fonctionnement du modèle IMPACT 2002+ pour un stockage souterrain de déchets

En fin de compte, cette démarche permet d'aboutir à des valeurs de l'indicateur qu'il convient de considérer comme des ordres de grandeurs, suffisants pour permettre une comparaison des scénarios entre eux.



### 3. PROBLÉMATIQUE ET SCÉNARIOS

Pour cette étude, il ne s'agit pas de comparer un ou plusieurs scénarios de déstockage à un stockage illimité mais de comparer plusieurs scénarios de déstockage et de stockage illimité tels que définis au paragraphe 1 de ce rapport.

Les phases des scénarios, les données statistiques d'accidentologie, les accidents types, les facteurs de caractérisation d'impact des substances et leurs modes d'application sont inchangés ; on peut donc se reporter au rapport précédent pour en retrouver le détail.

#### 3.1 PARTIE DES SCÉNARIOS RELATIVE AU DÉSTOCKAGE-TRANSPORT-RESTOCKAGE

La partie déstockage comprend, le déstockage propre à StocaMine, le transport des déchets déstockés vers le site de Sonderhausen et le restockage sur ce site. Les types de risque associés à ces tâches sont (Figure 5) :

- le risque minier, spécifique au contexte dans lequel le stockage se situe ;
- le risque mécanique (risque de dommage corporel sur les travailleurs), quelle que soit l'étape considérée (déstockage, transport, restockage) ;
- le risque physico-chimique, par exposition des travailleurs, également quelle que soit l'étape ;
- le risque de pollution accidentelle, lors des manipulations dans la mine (air extérieur) ou lors du transport (air, cours d'eau, nappe, sol) ;
- le risque de remobilisation de polluants vers la nappe, l'air, les eaux de surface et ses implications (irrigation, consommation, contact).

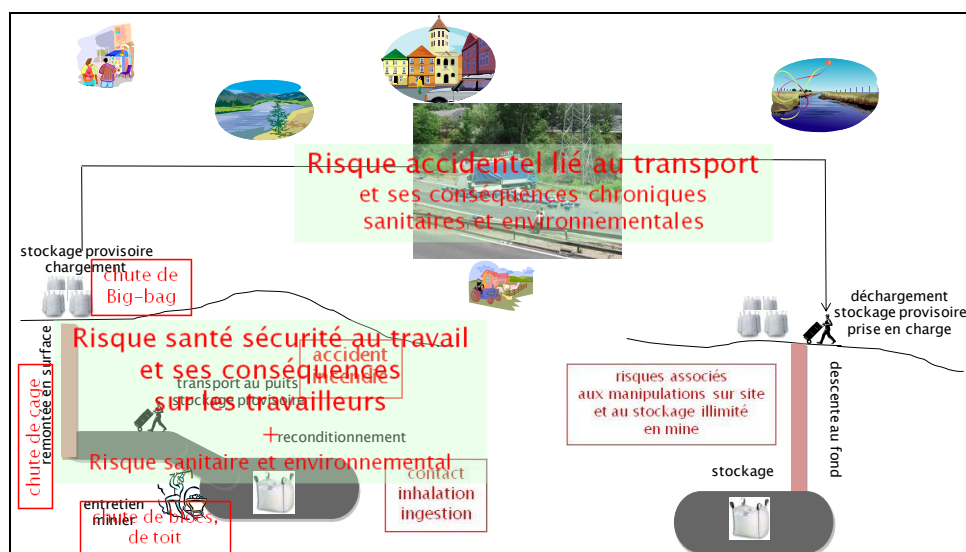


Figure 5 – Schéma conceptuel du déstockage-transport-restockage et risques associés

Pour le **déstockage** à Wittelsheim, outre les études réalisées et référencées dans le rapport INERIS-DRS-13-141706-11148A, StocaMine a amélioré la connaissance des scénarios de déstockage sur la base des estimations de temps de travail issues des compléments d'études effectués par BMG ou des précisions apportées lors de la consultation d'entreprises.

Ces éléments ont permis de synthétiser, pour chaque scénario de déstockage à StocaMine, l'effectif nécessaire pour chacune des opérations et la durée de celles-ci. StocaMine a ainsi pu construire le Tableau 3.

Pour chaque phase de chaque scénario, l'indicateur a donc été évalué en prenant en compte l'effectif des travailleurs (et de l'encadrement compris assistance maîtrise d'ouvrage et maîtrise d'oeuvre) directement impactés.

Evolution des effectifs																				
		2014			2015			2016			2017			2018			2019	2020	2021	2022
		MDPA	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3			
StocaMine	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10					
AMO PS	1	1	1	1	1				1	1	1	1	1	1	1					
MOE	1	1	1	1	1				1	1	1	1	1	1	1					
déstockage	21	21	21	21	21															
barrages									20	20	20	20	20	20	20					
remplissage									10	10	10	10	10	10	10					
total	36	36	36	36	36	13	13	13	35	45	45	45	45	45	45					
		2014			2015			2016			2017			2018			2019	2020	2021	2022
MDPA	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
StocaMine	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
AMO PS	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
MOE	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
déstockage	21	21	21	21	21	42	42	42	42	42	42									
barrages									20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	
remplissage									10	10	10	10	10	10	10	10				
total	36	36	36	36	36	57	57	57	57	57	57	35	45	45	45	45	35	35	35	
		2014			2015			2016			2017			2018			2019	2020	2021	2022
MDPA	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
StocaMine	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
AMO PS	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
MOE	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
déstockage	21	21	21	21	21	42	42	42	42	42	42	42								
barrages									20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	
remplissage									10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
total	36	36	36	36	36	57	57	57	57	57	67	67	87	45	45	45	45	45	45	
		2014			2015			2016			2017			2018			2019	2020	2021	2022
MDPA	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
StocaMine	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
AMO PS	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
MOE	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
déstockage	21	21	21	21	21	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42			
barrages									20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	
remplissage									10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
total	36	36	36	36	36	57	57	57	57	57	57	57	57	67	67	67	67	25	45	
		2014			2015			2016			2017			2018			2019	2020	2021	2022
MDPA	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
StocaMine	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
AMO PS	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
MOE	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
déstockage	21	21	21	21	21	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	
barrages																	20	20		
remplissage													10	10	10	10	10	10	10	
total	36	36	36	36	36	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	
		2014			2015			2016			2017			2018			2019	2020	2021	2022
MDPA	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
StocaMine	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
AMO PS	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
MOE	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
déstockage	21	21	21	21	21	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	
barrages																				
remplissage																				
total	36	36	36	36	36	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	

Tableau 3 – Effectif des travailleurs affectés aux travaux de déstockage et durée des phases des scénarios selon les variantes (données StocaMine)

Ce tableau n'est pas directement utilisable car tous les travailleurs ne sont pas concernés par les mêmes risques sur des durées identiques. Un traitement complémentaire effectué par l'INERIS a permis d'évaluer, pour chaque phase homogène d'une durée donnée, les travailleurs affectés à cette phase, le résultat étant exprimé en « personne.an ».

Pour exemple, le Tableau 4 donne le calcul en « personne.an » de l'effectif affecté aux tâches de déstockage, de mise en place des barrages et de remplissage des blocs et galeries vides pour le scénario V1.

Entité	nbres au fond	durée en année	pers.an
MDPA	0	5	0
StocaMine	9	5	45
AMO PS	1	4,25	4,25
MOE			0
déstockage	20	1,25	25
barrages	20	3	60
remplissage	10	1,75	17,5
		Total	151,75

Tableau 4 – Exemple de calcul d'un effectif en personne.an d'une phase de scénario

C'est alors ce résultat auquel sont appliquées les différentes données statistiques d'accidentologie (accidents létaux ou avec invalidité permanente). Le facteur de caractérisation permet ensuite la transformation en DALY et l'addition des valeurs de l'indicateur pour la phase étudiée, puis des différentes phases du scénario.

Pour le **transport**, une seule destination est retenue, Sondershausen ; elle est issue du résultat de la consultation d'entreprises. Le transport par route, solution la plus adaptée retenue lors de l'étude précédente, conduit à un trajet de l'ordre de 580 km. L'itinéraire est représenté sur la Figure 6 sur laquelle on remarque que la plus grande part du trajet s'effectue sur autoroute et en Allemagne.

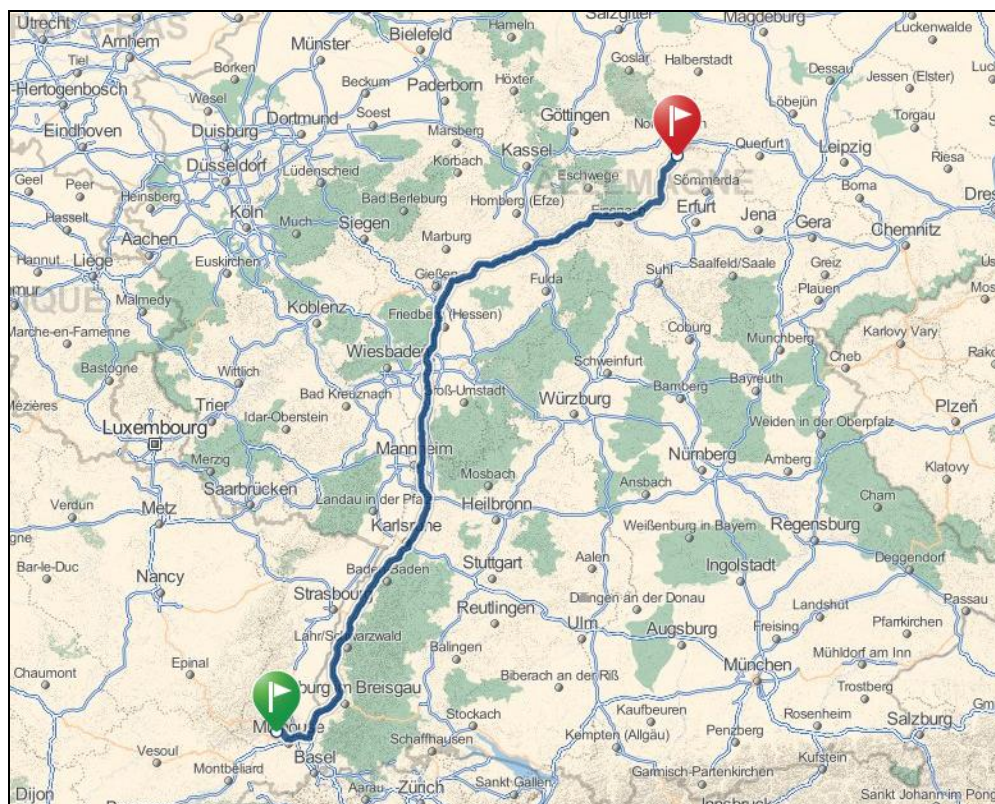


Figure 6 – Itinéraire entre Wittelsheim et Sondershausen (Mappy©)

Comme pour l'étude précédente, pour l'impact sanitaire du transport, le calcul intègre :

- le risque routier proprement dit (risque d'accidents liés à la circulation et ses conséquences : létalité et incapacité permanente des chauffeurs routiers et usagers de la route) ; il est calculé à partir du kilométrage à effectuer et des statistiques d'accidents de circulation spécifiques du transport des matières dangereuses (dernières données du ministère chargé des transports pour 1997-1998, exprimées en fréquence par tonne transportée) ;
- le risque sanitaire sur les populations consécutif à un déversement de déchets dans l'environnement lors d'un accident routier ; il est évaluée également à partir du kilométrage à parcourir, la probabilité de survenue d'un accident routier, un scénario d'accident conduisant à la production d'une quantité unitaire de polluant, la quantité unitaire étant pondérée par les probabilités linéiques respectives de déversement au sol et dans l'eau et des densités de population sur le parcours (fourchettes hautes et basses issues de statistiques INSEE).

Pour le premier point, le facteur de caractérisation permet l'obtention immédiate de la valeur de l'indicateur en DALY, comme pour l'accidentologie au déstockage.

Pour le second point, l'accident type de l'étude précédente a été repris et a donc permis d'estimer l'impact à court terme sur la population présente à l'intérieur des zones d'effet de cet accident. Puis les quantités de substances toxiques dispersées lors d'un accident ont également été utilisées dans le modèle multimédia « IMPACT 2002+ » pour estimer les impacts sanitaires globaux (à long terme).

Pour le **restockage** à Sondershausen, aucune approche particulière n'a été réalisée. Comme lors de l'étude de comparaison précédente, le calcul est réalisé sur des bases identiques à celles des opérations de déstockage à Wittelsheim en considérant une charge de travail correspondante réduite dans un facteur arbitraire de 1 pour 4 (cf. valeurs précédentes). Cette hypothèse tient compte du fait que le site est en activité, dispose en permanence de l'ensemble des moyens et équipements et que les ouvrages souterrains sont maintenus en bon état. En résumé, on a considéré que le stockage sur ce site nécessiterait 4 fois moins d'unités de main d'œuvre que le déstockage sur le site de Wittelsheim.

### 3.2 PARTIE DES SCÉNARIOS RELATIVE AU STOCKAGE ILLIMITÉ

Le stockage illimité, que ce soit à Wittelsheim ou à Sondershausen, entraîne un effet long terme. Comme lors de l'étude de comparaison précédente, il s'agit d'une combinaison de deux mécanismes : l'envoyage des sites et la convergence du stockage. L'envoyage met en contact la saumure avec les déchets qui conduit à une saumure polluée dont la composition dépend d'un équilibre géochimique entre les différentes substances présentes. La convergence du stockage permet l'expulsion de la saumure polluée vers la surface et les aquifères.

Pour la présente étude, les hypothèses ont été prises identiques à celle de l'étude de comparaison précédente, notamment la mise en place de barrières ouvragées aux différentes issues du stockage. Pour rappel, ces barrières sont destinées simplement, d'une part, à ralentir l'envoyage du stockage pendant la convergence des vides et donc la quantité de saumure polluée produite et, d'autre part, à ralentir l'expulsion de la saumure polluée vers les vides miniers puis vers le milieu extérieur.

Comme précisé ci-dessus, les mécanismes d'envoyage et de convergence du site StocaMine à Wittelsheim sont identiques pour tous les scénarios et identiques à ceux exprimés dans l'étude de comparaison précédente. On pourra s'y reporter pour plus de détail.

Toutefois, si les mécanismes sont inchangés, la nature et la quantité de déchets dans le site de StocaMine changent pour chaque scénario. Une actualisation de l'estimation de la qualité du « terme source » a été réalisée en prenant en compte, pour chaque scénario, la quantité et la composition des déchets ; cela permet d'obtenir, par modélisation des équilibres géochimiques entre saumure et déchets, un terme source adapté à chaque scénario. Cette étude a été réalisée en préalable et a permis d'obtenir la concentration du terme source applicable pour chacun des scénarios ; elle fait l'objet du rapport INERIS- DRC-13-140901-10732A d'octobre 2013.

Elément	Pas de retrait g/l	Retrait 56% B3 B5	Retrait bloc 21 22	Retrait 93% B3 B5	Retrait bloc 12 21 22 23	Retrait sauf bloc 15
Cu	1.93E-07	1.94E-07	1.63E-07	1.95E-07	2.32E-07	1.97E-07
Ba	2.30E-07	2.39E-07	1.90E-07	2.42E-07	3.01E-07	2.72E-07
Ni	3.05E-07	7.78E-07	1.00E-03	1.00E-03	1.00E-03	3.08E-07
Pb	4.53E-07	4.56E-07	6.07E-07	4.57E-07	3.82E-07	4.39E-07
Bi	6.95E-06	6.96E-06	5.43E-06	6.96E-06	8.76E-06	7.31E-06
Co	8.29E-06	8.26E-06	1.16E-05	4.74E-02	1.24E-01	8.37E-06
Cd	1.54E-03	1.56E-03	2.56E-03	7.12E-01	1.24E+00	1.54E-03
As	1.54E-02	1.42E-02	1.78E-02	1.39E-02	1.14E-02	1.27E-02
Ag	3.88E-02	5.30E-02	5.50E-02	5.20E-02	7.60E-02	3.91E-02
Sb	1.89E-01	1.92E-01	1.21E-01	1.92E-01	3.01E-01	1.90E-01
CN	6.80E-01	7.67E-01	9.71E-01	8.42E-01	1.55E+00	2.70E-02
Cr	7.07E+00	7.07E+00	9.12E+00	8.27E+00	1.11E+01	5.16E+00
Hg	7.52E+00	3.46E+00	3.16E+00	5.26E-01	9.02E-01	3.01E-01

Tableau 5 – Tableau des concentrations en g/l - rapport INERIS- DRC-13-140901-10732A



Comme précédemment, elle évalue la concentration des 12 principaux polluants métalliques et du cyanure (jouant le rôle de complexant) pour chacun des scénarios en supposant la mise en place de barrières ouvragées. Associées aux volumes de dilution correspondants, les deux données ont permis de calculer, pour chaque scénario, les masses respectives de polluants potentiellement rejetées dans la nappe d'Alsace utiles à la modélisation des impacts. Celles-ci ont été introduites dans le modèle multimédia « IMPACT 2002+ » qui prend en compte des facteurs de caractérisation propres à chacune de ces substances, ce qui permet d'exprimer, comme déjà précisé, un impact sanitaire global exprimé en DALY.

Pour l'effet à long terme à Sondershausen, aucune étude particulière n'a été réalisée. Toutefois, ce site fait partie des sites examinés par Bernard FEUGA en 2010. La synthèse des tableaux 6.2 à 6.4 de ce rapport met en évidence une assez bonne similitude entre les sites de Wittelsheim et de Sondershausen, tant en ce qui concerne la géologie que l'hydrogéologie. Le mode d'exploitation tend à minimiser la présence de vide autour des déchets, le comportement géochimique sera donc du même ordre que celui à Wittelsheim.

Aussi, l'évaluation de l'impact sanitaire du stockage illimité à Sondershausen est fondée sur les mêmes mécanismes et suppose un comportement géochimique et un mode d'expulsion similaires pour les masses de déchets qui y sont restockées.

Enfin, comme dans l'étude de comparaison précédente, l'impact sanitaire de l'utilisation de l'eau de nappe en eau de boisson par les riverains des stockages considérés a aussi été évalué à partir d'une hypothèse de consommation plausible en utilisant les facteurs de caractérisation spécifiques de cet usage, pour chacune des substances concernées. Cet impact particulier est très faible ; il représente moins de 1 % de l'indicateur sanitaire global.

Avant l'expulsion de saumure polluée, l'air contenu dans les vides miniers serait chassé vers l'atmosphère extérieure sous l'effet de l'ennoyage de la mine. Malgré l'absence de mise en évidence de polluants dans l'atmosphère du stockage, lors de mesures faites par l'INERIS, l'hypothèse a été faite que cet air pourrait se charger en polluants émis par les déchets suite à la dégradation ou rupture des fûts. Quatre polluants ont été retenus (mercure, arsine, acide cyanhydrique, phénol). Les concentrations potentielles dans l'air et donc les masses de polluants rejetées vers l'atmosphère externe ont été déduites des mesures faites en tête de fûts (source StocaMine) qui constitue une approche majorante.

Comme pour l'eau, deux impacts ont été pris en compte :

- un impact global calculé par le modèle « IMPACT 2002+ » (même méthode que précédemment, facteurs de caractérisation propres à l'air) ;
- un impact « local » en considérant une exposition directe des personnes à une émission dans un local (sous-sol, rez-de-chaussée d'habitation). Ce calcul ponctuel est également réalisé au moyen du modèle « IMPACT 2002+ ».

## 4. RÉSULTATS DE L'ÉTUDE DE COMPARAISON - COMMENTAIRES

Rappelons que cette comparaison ne prend en compte que les risques sanitaires (population générale et travailleurs), à court et long termes ; elle exclut donc de la comparaison les autres risques (changement climatique, ressources...) ainsi que les coûts.

Il convient de préciser que, dans cette comparaison, la totalité des déchets solubles présents au sein du stockage (terme source) a été considérée comme mobilisable et transportée, sous l'effet du mécanisme de fluage du sel, vers l'extérieur, à long terme, à StocaMine comme à Sondershausen. Ce raisonnement provient :

- de l'hypothèse d'ennoyage, inéluctable à terme, de tout site de stockage en milieu salin ;
- de la prise en compte du phénomène de fermeture progressive et *in fine* totale des vides miniers sous l'effet du fluage du sel, donc d'expulsion lente de la saumure polluée au contact des déchets ;
- du comportement des principales substances toxiques en présence de saumure ;
- de la masse respective des substances toxiques dans les déchets qu'ils soient stockés sur l'un ou l'autre des sites.

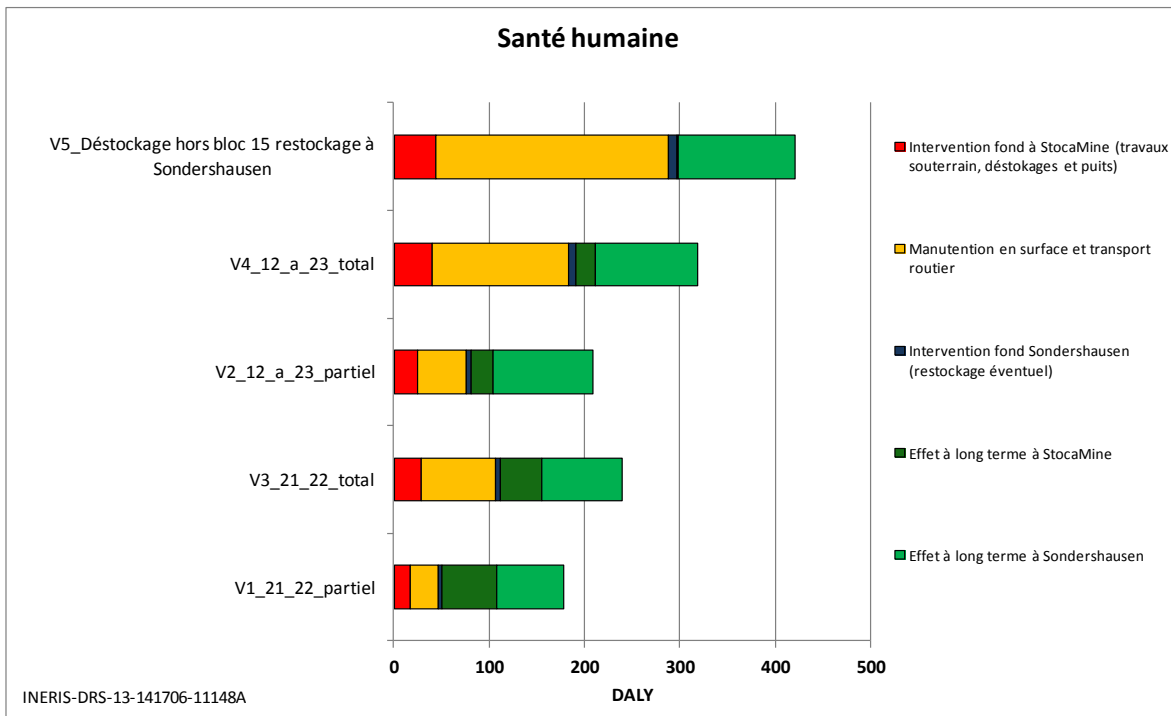
Soulignons, en outre, que l'hypothèse adoptée quant au transport vers l'extérieur de la totalité des déchets solubles conduit à majorer l'impact des déchets.

Rappelons enfin que la comparaison des différents scénarios est fondée sur la seule masse des déchets disponibles à StocaMine et non, bien évidemment, sur la totalité des déchets disponibles à terme dans le site de Sondershausen.

Une couleur différente a été affectée à chacun des risques « élémentaires » pour que l'on puisse apprécier la contribution individuelle de chaque étape ou groupe d'étapes dans la valeur globale de l'indicateur. L'absence apparente de couleur ne signifie pas que le risque soit absent ou non intégré mais traduit simplement que sa valeur est faible par rapport aux autres à l'échelle globale de la représentation.

Le graphe de la figure suivante issu de l'étude montre que :

- les effets à long terme globaux des déchets stockés, qu'ils soient tout ou partie à StocaMine ou à Sondershausen, sont à peu près les mêmes, car le comportement géochimique des déchets à Sondershausen est comparable à celui des déchets à StocaMine comme cela était le cas pour le site d'Herfa-Neurode (pourcentage de vides résiduels faible) ;
- la part d'impact des tâches de déstockage et transport croît avec la masse déstockée et transportée, ce qui est parfaitement logique ;



- par rapport à l'évaluation précédente, la part liée au transport a été augmentée d'environ 20 % (environ 580 km pour Sondershausen au lieu de 475 km pour Herfa-Neurode) ce qui accroît d'autant la barre correspondante ;
- l'amélioration des données d'entrée a conduit à diminuer légèrement l'effet long terme entre les deux évaluations car la masse de contaminant a été mieux cernée ;
- enfin, les statistiques d'accident au fond appliquées lors des évaluations prennent en compte les effets physiques des accidents mécaniques mais aussi les effets physiques et chimiques liés à la chute et à l'éventrement d'un bigbag lors des manipulations ; les statistiques utilisées sont génériques et peuvent varier en fonction du nombre réel de personnes affectées à un poste donné.

L'étude de comparaison réalisée en 2012 intégrait une incertitude spécifique liée à l'antimoine ; celle-ci n'impactant toutefois pas la hiérarchie des scénarios, elle n'a pas été reprise ici.

Il s'agit d'une comparaison de scénarios ; pour le scénario retenu, il conviendra d'en affiner les impacts en termes de toxicité, notamment sous l'angle du respect des valeurs réglementaires ; sur la base des résultats obtenus, il sera nécessaire de développer des moyens de maîtrise du risque pour diminuer, réduire ou supprimer les effets sur l'environnement et la santé humaine.



Enfin, il est à noter que l'analyse des données sur les déchets de StocaMine, réalisée par l'INERIS en 2011 et 2012 a permis, préalablement à l'étude de comparaison précédente, de réduire sensiblement la marge d'incertitude sur les masses moyennes des différents éléments présents. Toutefois, du fait de la méthode d'analyse semi-quantitative mise en œuvre par StocaMine, ces valeurs moyennes demeurent affectées par une marge d'incertitude encore significative, estimée à  $\pm 50\%$  de la valeur moyenne de la masse de chaque substance. Cette incertitude affecte, dans le calcul des indicateurs, les parts relatives aux effets à long terme. Celles-ci seraient toutes modifiées proportionnellement à la masse effective de substances. De ce fait, cette incertitude ne modifie pas qualitativement la hiérarchie des scénarios comparés. La conclusion de cette étude reste donc valable.



## 5. SYNTHÈSE

En complément des études réalisées par l'INERIS depuis 2011, StocaMine a sollicité l'INERIS pour compléter l'analyse de scénarios de déstockage des déchets entreposés à Wittelsheim par rapport aux scénarios étudiés en 2012. Ces scénarios sont les suivants :

- V1 – déstockage des déchets B3 et B5 des blocs 21 et 22 correspondant au déstockage de 56 % de la masse de mercure (évaluation StocaMine) ; c'est le scénario retenu pour le montage du dossier de demande de stockage illimité ;
- V2 - en complément du choix précédent, déstockage des déchets B3 et B5 des blocs 12 et 23, ou autrement dit les déchets B3 et B5 des blocs 12, 21, 22 et 23, l'ensemble correspondant à 93 % de la masse de mercure (évaluation StocaMine) ;
- 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 ; il constitue une extension du scénario V1 ;
- V4 – déstockage de tous les déchets des blocs 12, 21, 22 et 23 ; il s'agit d'une extension du scénario V2 ;
- V5 – déstockage de tous les déchets, à l'exception ceux du bloc 15 dont l'accès est jugé trop dangereux pour les travailleurs.

La méthodologie d'évaluation de ces scénarios est conforme à celle mise en œuvre dans le rapport INERIS-DRS-13-141706-11148A de janvier 2012 dont nous rappelons les grands principes ci-après. Cependant, les valeurs d'indicateur obtenues ne sont pas comparables en l'état car, entre ces deux analyses, les hypothèses ont été affinées tant sur la connaissance de la quantité de substance contenue dans les déchets que sur la durée effective des travaux. Enfin, l'étude précédente avait montré que l'indicateur environnemental global n'était pas discriminant pour la comparaison des scénarios ; la présente évaluation s'est donc attachée à celle de l'indicateur d'impact sur la santé humaine uniquement.

### **Rappel de la méthodologie**

L'objectif de l'étude menée en 2012 était de rechercher et mettre en œuvre une méthodologie permettant d'agrèger ou d'additionner des impacts sanitaires et environnementaux en autorisant le rapprochement d'informations de natures différentes :

- risques sanitaires (population générale et travailleurs),
- risques accidentels,
- risques pour l'environnement,

que ces risques soient aigus ou chroniques, à court ou long terme.

Dans cette approche, les impacts sur le changement climatique, les ressources naturelles et les coûts n'ont pas été pris en compte. De même, la méthodologie utilisée n'est pas destinée à prendre en compte les aspects réglementaires, sanitaires ou environnementaux contraints par des valeurs limites, guides ou autorisées. Elle est fondée sur le fait qu'une masse de substance dispersée dans l'environnement produit des effets sanitaires ou environnementaux qui peuvent être traduits en indicateurs globaux de risques.

De plus, la méthodologie retenue permet d'évaluer de manière homogène et simple la valeur des indicateurs globaux de risque pour chacun des scénarios examinés, donc de les situer les uns par rapport aux autres et de bien identifier celui qui présente les risques cumulés les plus faibles. Une fois cette démarche réalisée, le scénario choisi doit être examiné en prenant en compte les contraintes réglementaires, sanitaires et environnementales en cherchant à minimiser les risques au travers de la mise en place de Moyens de Maîtrise du Risque (MMR).

La démarche mise en œuvre s'est inspirée des méthodes d'Analyse du Cycle de Vie (ACV) et donc des normes NF-EN-ISO-14040 et 14044 d'octobre 2006. Ces méthodes d'évaluation du risque existent en mode opérationnel et sont publiées dans la littérature scientifique internationale. Elles permettent, après simplification et homogénéisation des données et informations, parfois hétérogènes en qualité et quantité ou de natures différentes, de les traiter et de les collationner. Enfin, la méthodologie facilite la comparaison des scénarios par l'utilisation d'indicateurs globaux de risque.

Comme indiqué préalablement, les études menées en 2012 ont montré que l'indicateur environnemental (notamment la biodiversité) n'était pas discriminant pour le « classement » des scénarios. C'est pourquoi, à la différence de l'étude 2012, dans cette évaluation, seul l'indicateur d'impact sur la santé humaine, indicateur global adopté par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), a été retenu. Il s'agit de la DALY (Disabled-Adjusted-Life-Year). Cet indicateur se traduit par « Années de vie corrigée de l'incapacité » (on trouve aussi « années de vie ajustées aux handicaps »). Il cumule les décès et incapacité, temporaire ou permanente, que l'origine en soit accidentelle ou non.

## **Données**

Les données nécessaires pour évaluer ces scénarios sont à la fois celles permettant d'évaluer les « aléas » que l'on peut assimiler ici à tout ce qui peut affecter l'humain et celles définissant les « enjeux » ici les populations affectées, travailleurs ou population générale.

Les données « d'aléa » sont les mêmes que celles utilisées lors de l'étude précédente ; elles ont été approchées en identifiant les étapes majeurs de travaux et les risques associés à ces étapes.

Les étapes majeures identifiées dans ces scénarios ont rassemblé plusieurs tâches unitaires qui présentent des impacts ou risques pouvant être analysés de manière homogène comme :

- l'entretien minier ;
- les travaux d'édification des barrages et travaux connexes ;
- le reconditionnement et le transport jusqu'en surface ;

- le transport vers le lieu de stockage identifié ;
- le restockage dans le nouveau site.

Les types de risques associés à ces tâches sont :

- le risque minier, spécifique au contexte dans lequel le stockage se situe ;
- le risque mécanique (risque de dommage corporel sur les travailleurs), quelle que soit l'étape considérée (travaux de réalisation de barrières, déstockage, transport, restockage) ;
- le risque physico-chimique, consécutif à l'exposition des travailleurs aux substances chimiques contenues dans les déchets, là encore quelle que soit l'étape ;
- le risque de pollution accidentelle apparaissant lors des manipulations dans la mine (air extérieur) ou lors du transport d'un site à l'autre (air, cours d'eau, nappe, sol) ;
- le risque de remobilisation et transfert de polluants vers la nappe, l'air, les eaux de surface et ses implications (irrigation, consommation, contact).

A partir de tous ces éléments, l'indicateur global de risque sanitaire a été évalué pour chacun des scénarios examinés grâce à :

- une phase d'inventaire de toutes les étapes du scénario considéré ;
- dans chacune de ces étapes, une identification et une quantification des impacts potentiels ;
- et, pour chacun de ces impacts, l'évaluation du (ou des) valeur(s) de l'indicateur qui en découle.

L'indicateur a été évalué, selon la nature et le type des données, par l'une des deux méthodes suivantes :

- soit sur la base de statistiques d'accidentologie (CdF, BTP, INRS...) et de durées d'exposition (en personne.an pour les travaux, par modélisation en cas d'accident routier...) ;
- soit par modélisation globale des effets des substances en utilisant un modèle intégrateur dit « de compartiment » (aquatique et terrestre) à l'échelle spatiale européenne sans notion de temps (modèle IMPACT 2002+ développé par l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne). S'agissant du risque sanitaire, ce modèle intègre les effets sur toutes les personnes exposées, travailleurs comme population générale.

Les données « d'enjeux » sont de deux natures : les travailleurs directement affectés aux tâches des différentes étapes identifiées mais aussi les populations générales qui pourraient être affectées par ces « aléas » lors de la réalisation des travaux comme les personnes présentes autour d'un accident de la circulation lors du transport entre le site de déstockage de Wittelsheim vers le site de restockage de Sondershausen. Les populations générales affectées sont les mêmes que lors des études précédentes, seules les valeurs caractérisant « l'aléa » sont modifiées quantitativement ou qualitativement.

Pour la présente évaluation, les données relatives au personnel affecté aux travaux et la durée de ceux-ci ont été fournis par StocaMine sous la forme d'un tableau (effectifs fermeture (2).xlsx) duquel a été tirée pour chaque tâche la valeur exprimée en personne.an. Ce sont ces valeurs auxquelles nous avons affecté, pour chaque tâche et chaque scénario, les statiques d'accidentologie.

Enfin, pour les enjeux à long terme (part relative au stockage illimité), les populations affectées sont les mêmes que lors de l'évaluation précédente. Cependant, les masses des substances ont été affinées au fur et à mesure de l'avancement des études par une meilleure connaissance des déchets mais aussi par la prise en compte de la différence entre la masse brute et la masse réelle en déduisant la masse des contenants (fûts, palettes...). Ainsi, du fait de l'intégration de cette amélioration des connaissances, les deux études ne sont pas directement comparables.

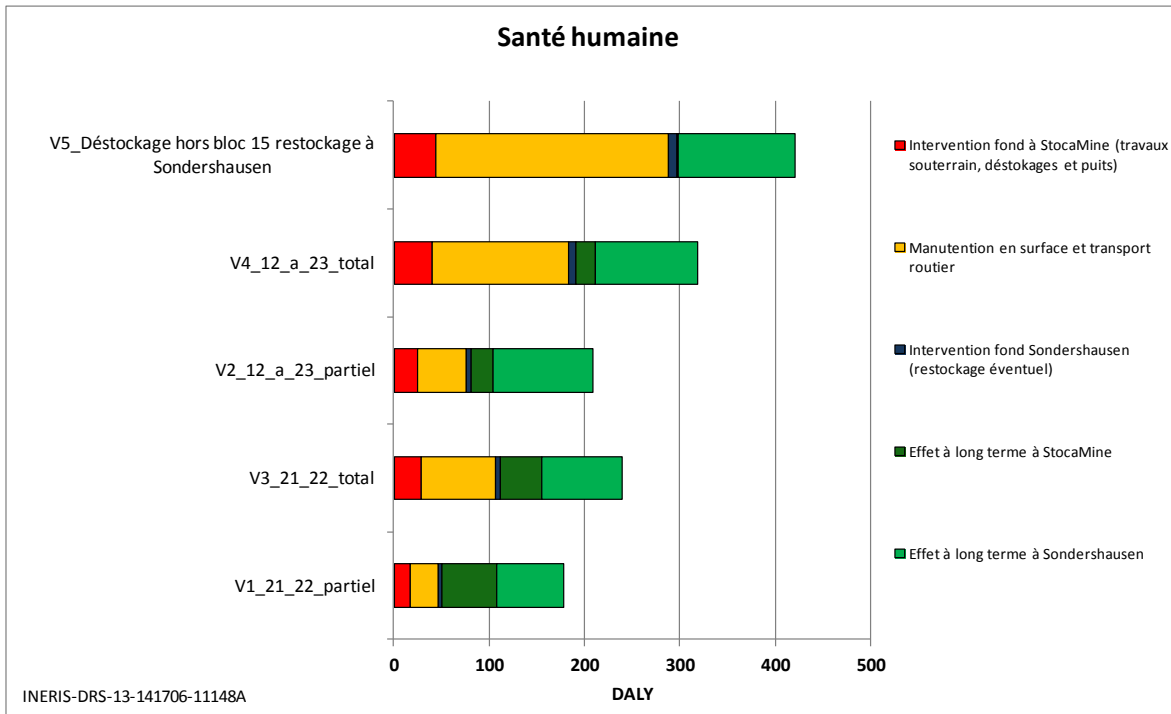
Dans la présente évaluation, les déchets sont considérés être stockés définitivement soit à StocaMine, soit à Sondershausen, site retenu pour le déstockage par StocaMine à la suite des appels d'offres. Le comportement géochimique des déchets sur le site de StocaMine a été évalué lors des études précédentes ; il a été repris ici en fonction de la masse réelle qui y était maintenue, différence entre la masse déstockée et la masse totale. La composition des déchets est issue d'une étude spécifique qui tient compte, pour chaque lot, de la masse de substances impactantes obtenue par analyse du lot rapporté à l'ensemble du lot. Cela a permis d'obtenir une valeur aussi proche que possible des masses réelles stockées et déstockées, à la précision près des analyses réalisées et de leur représentativité pour un lot. Ces résultats font l'objet du rapport INERIS-DRC-13-140901-10732A.

Pour le restockage à Sondershausen, le comportement géochimique des déchets déposés a été supposé identique à celui des déchets laissés à StocaMine, comme cela avait été le cas pour le site d'Herfa-Neurode précédemment car des dispositions de remblaiement sont prises pour que le pourcentage de vides résiduels soit faible. Toutefois, le site de Sondershausen se situe 100 km au-delà du site d'Herfa-Neurode. Ce fait a été pris en compte dans l'étude sur le transport.

## Résultats

Le graphe de la figure suivante issu de l'étude montre que :

- les effets à long terme globaux des déchets stockés, qu'ils le soient en tout ou partie à StocaMine ou à Sondershausen, sont à peu près les mêmes, car le comportement géochimique des déchets à Sondershausen est comparable à celui des déchets à StocaMine, comme cela était le cas pour le site d'Herfa-Neurode (pourcentage de vides résiduels faible) ;
- la part d'impact des tâches de déstockage et transport croît avec la masse déstockée et transportée, ce qui est logique ;



- par rapport à l'évaluation précédente, la part liée au transport a été augmentée d'environ 20 % (environ 580 km pour Sondershausen au lieu de 475 km pour Herfa-Neurode), ce qui accroît d'autant l'impact total correspondant ;
- l'amélioration des données d'entrée a conduit à diminuer légèrement l'effet long terme entre les deux évaluations car les masses de contaminants a été mieux cernée ;
- enfin, les statistiques d'accident au fond appliquées lors des évaluations prennent en compte les effets physiques des accidents mécaniques mais aussi les effets physiques et chimiques liés à la chute et à l'éventrement d'un bigbag lors des manipulations ; les statistiques utilisées sont génériques et peuvent varier en fonction du nombre réel de personnes affectées à un poste donné.