

Etude technique et financière de la faisabilité de la poursuite d'un déstockage partiel, en parallèle de la poursuite du confinement

Définition du scénario S4

Projet n°ALSP190266 – 30 septembre 2020

Rapport n°A106472/C



Fiche signalétique

Etude technique et financière de la faisabilité de la poursuite d'un déstockage partiel, en parallèle de la poursuite du confinement



Définition du scénario S4

CLIENT SITE D'INTERVENTION

MDPA	MDPA
Avenue Joseph Else – BP 50 68 310 Wittelsheim	Avenue Joseph Else – BP 50 68 310 Wittelsheim
Détails du client	Mme Céline Schumpp Liquidatrice amiable et Secrétaire Générale Tél : +33 3 89 57 87 32 Mail : c.schumpp@mdpa.fr

RAPPORT D'ANTEA GROUP

Direction de projet	Stéphane HEUDE Sophie JANVIER (adjointe)
Rapport n°	A106472 – Définition du scénario S4
Version n°	Version C
Votre commande et date	Marché n° 2019-MF001 - A.E. du 03/09/2019
Projet n°	ALSP190266

	Nom	Fonction	Date	Signature
Rédaction :	Stéphanie DUGENEST	Ingénieur Référent	30/09/2020	
Approbation :	Sophie JANVIER	Directrice de projets Infrastructures	30/09/2020	

Suivi des modifications

Indice Version	Date de révision	Nombre de pages	Nombre d'annexes	Objet des modifications
A	19 mai 2020	14	3	Création
B	3 septembre 2020	14	3	Prise en compte des remarques techniques des MDPAs
C	30 septembre 2020	15	3	Version définitive

Sommaire

1. Introduction.....	4
2. Documents liés	6
2.1. Documents MDPA	6
2.2. Document Antea Group / Tractebel.....	6
3. Définition du scénario S4	7
3.1. Evaluation du terme source et étude d'impact réalisées	7
3.2. Etude des interactions entre déchets	7
3.3. Proposition du scénario S4.....	9
3.3.1. Comparaison des deux approches et conclusions	9
3.3.2. Méthodologie de sélection des déchets à déstocker.....	9

Table des tableaux

Tableau 1 : Synthèse des masses élémentaires déstockables par catégorie de déchet	10
Tableau 2 : Synthèse des masses élémentaires déstockables majoritaires au sein des catégories de déchet	12
Tableau 3 : Tonnages du scénario S4 – Comparaison aux tonnages des autres scénarios	14
Tableau 4 : Proportions de colis déstockés par scénario	15

Table des annexes

Annexe I : Rapport d'étude Curium
Annexe II : Répartition des masses élémentaires par catégorie de déchet et par bloc
Annexe III : Recherche des masses élémentaires prépondérantes – Identification des CAP

1. Introduction

Le projet StocaMine, autorisé en février 1997, prévoyait de stocker des déchets dangereux pendant une durée de trente ans et dans des conditions réversibles en exploitation, dans des galeries creusées à cet effet dans les couches de sel gemme situées sous les anciennes couches du gisement de potasse exploité par les Mines De Potasse d'Alsace (MDPA) à Wittelsheim (68).

L'incendie survenu dans le bloc 15 en septembre 2002 a mis un terme à la poursuite de l'exploitation, alors qu'environ 44 000 tonnes de déchets ultimes avaient été stockées.

Un déstockage partiel de déchets mercuriels et de déchets phytosanitaires contenant du zirame, représentant environ 2 400 tonnes et contenant 95 % du mercure, a été achevé fin 2017.

Le confinement définitif des déchets non déstockés a été autorisé par arrêté préfectoral du 23 mars 2017. Les MDPA sont le maître d'ouvrage de la fermeture du stockage.

L'opération de confinement comprend la réalisation de douze barrages (ouvrages de scellement de galeries). Elle doit être achevée fin 2023 dans le scénario actuel et au plus tard en 2027.

A la demande de l'Etat, le BRGM a réalisé en 2018 une étude dont l'objet était l'analyse de la faisabilité technique et le délai d'une opération de déstockage total (hors bloc 15) sans en juger de la pertinence. L'étude du BRGM a conclu que le déstockage total (hors bloc 15) est envisageable et conduirait à un confinement définitif terminé aux environs de mi-2030.

Le Ministre de la Transition Écologique et Solidaire a alors annoncé en février 2019 le lancement d'une étude technique et financière de la faisabilité de la poursuite d'un déstockage partiel, en parallèle de la poursuite du confinement, pouvant se dérouler jusqu'à 2027.

Les MDPA ont confié cette étude au groupement Antea Group – Tractebel Engie.

Trois scénarios, intitulés S2, S3 et S4, sont analysés :

- S2 : déstockage de 100% des déchets hormis ceux du bloc 15, option dont la faisabilité a été développée par le BRGM ;
- S3 : déstockage de l'ensemble des déchets hormis ceux du bloc 15, à l'exclusion des résidus d'incinération, des déchets amiantés et des déchets générés par le chantier de déstockage achevé en 2017, solution alternative également développée par le BRGM dans son rapport ;
- S4 : déstockage supplémentaire de déchets à définir en qualité et en quantité dans le cadre de la présente étude.

Pour chacun de ces scénarios, seront évalués les conditions de sécurité, le bénéfice environnemental et les coûts.

L'étude comprend neuf volets définis dans le cahier des charges :

- Volet 1 : Elimination des déchets déstockés ;
- Volet 2 : Evaluation des risques sécurité et environnementaux ;
- Volet 3 : Etude des techniques à mettre en œuvre et de leur sécurisation – prise en compte des contraintes de la mine ;
- Volet 4 : Etude logistique et planification ;
- Volet 5 : Analyse des conséquences sur le projet de confinement ;

- Volet 6 : Mise en situation des équipements existants pour un horizon 2027 ;
- Volet 7 : Etude des risques généraux et de leurs barrières ;
- Volet 8 : Inventaire des démarches administratives, de leurs délais et des conditions de réussite de ces démarches ;
- Volet 9 : Elaboration du budget.

Le présent rapport concerne la définition du scénario S4.

L'objectif du scénario S4 est de sélectionner les déchets prioritaires à déstocker en prenant en compte leur impact potentiel sur la nappe phréatique en cas de maintien en place et d'envoyage de la mine. Les incidences positives ou négatives doivent être appréciées.

La première partie du rapport présente les conclusions de l'étude confiée à Curium visant à :

- Etudier la méthodologie appliquée par l'Ineris et réaliser une analyse critique de leurs résultats de modélisation ;
- Elaborer une approche complémentaire par l'étude des interactions entre déchets.

A la lumière de ces éléments, les espèces prioritaires à déstocker dans le cadre du scénario S4 sont sélectionnées.

Dans la seconde partie du rapport, est décrite la méthodologie appliquée afin de préciser quantitativement le scénario S4 : en pourcentage de réduction des masses élémentaires des espèces chimiques retenues d'une part et en tonnes et en colis de déchets d'autre part.

2. Documents liés

2.1. Documents MDPA

- [1]. Rapport d'étude Curium - Définition du scénario de déstockage S4 « Déstockage des déchets pertinents pour limiter l'impact sur l'environnement » – v6 du 05/05/2020
- [2]. Rapport d'étude Ineris DRS-16-157108-05017 – Réponse aux sollicitations de l'autorité environnementale et du tiers expert, du 01/06/2016

2.2. Document Antea Group / Tractebel

- [3]. Rapport d'étude Antea Group – Tractebel A104101 – Volet 1 – Elimination des déchets déstockés, version C du 30/09/2020

3. Définition du scénario S4

3.1. Evaluation du terme source et étude d'impact réalisées

Curium [1] a étudié la méthodologie utilisée par l'Ineris [2] pour définir le terme source. Après validation de la méthode, ils se sont concentrés sur les résultats d'évaluation du terme source après déstockage de 93% du mercure (Hg), scénario dit 93 %, très proche de la situation actuelle équivalente au déstockage de 95 % de Hg.

A partir du terme source, l'Ineris a modélisé son impact sur les différentes couches géologiques jusqu'à la nappe en surface. Les concentrations estimées ont été rapportées aux concentrations observées dans l'environnement local (témoin, référence 1) ainsi qu'aux normes de qualité réglementaire des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine (référence 2). Ces rapports sont intitulés facteur de sécurité (FS) ; plus FS est élevé, plus le risque d'impact est faible.

Les résultats correspondants à l'état des stocks actuel de la mine font apparaître un trio de substances à déstocker prioritairement, composé de mercure (Hg), cadmium (Cd), et chrome (Cr) avec des FS du même ordre de grandeur. Vient ensuite le cyanure (CN) avec un FS 10 à 100 fois supérieur au premier groupe (selon le référentiel 1 ou 2). En 6^{ème} position, se trouve l'arsenic (As), avec un FS supérieur de 1 000 à 10 000 fois ceux des premiers.

Sur la base de leur retour d'expérience et en l'absence de données bibliographiques chiffrées, Curium émet des réserves quant au caractère peu soluble d'une forme de l'arsenic (arsénite de calcium, As III) que l'Ineris a considéré dans ces modélisations. Il est néanmoins difficile d'estimer l'incidence de ce changement d'hypothèse sur le résultat d'estimation du FS. L'arsenic se rapprocherait-il du premier trio ou atteindrait-il la 4^{ème} ou 5^{ème} position avec un écart toutefois toujours significatif avec le premier groupe ? En parallèle à cette étude, des essais sont réalisés en laboratoire par le BRGM pour apporter des éléments complémentaires.

Par conséquent, nous retenons par cette première approche, les éléments Hg, Cd et Cr, comme prioritaires à retirer de la mine. Nous reviendrons sur le cas de l'arsenic As dans la suite du document.

3.2. Etude des interactions entre déchets

Cette approche est très différente de la méthodologie de l'Ineris. Elle se base sur l'étude des interactions de couples de catégories de déchet (1 pour 1), en sélectionnant comme représentatives d'une catégorie, deux espèces chimiques. D'une matrice récapitulant toutes les conclusions des interactions étudiées, la démarche aboutit à une matrice simplifiée qui fait apparaître une tendance d'impact positif ou négatif sur l'environnement. En appliquant différentes pondérations aux impacts estimés, Curium obtient divers classements mais leurs conclusions se rejoignent.

Les résultats de hiérarchisation font en effet apparaître 6 catégories de déchet particulièrement pertinentes à déstocker. Il s'agit des :

- **Sels de trempage non cyanurés (A2) et cyanurés (A1 ; CN) ;**
- **Déchets chromiques (C4 ; Cr) ;**
- **Déchets arséniés (B3 ; As) ;**
- **Produits phytosanitaires (B10, As) ;**

- **Déchets mercuriels (B5, Hg).**

Ces classes sont en effet comprises dans un intervalle faible de cotation moyenne (de 1,5 à 3,5) ; il existe ensuite un écart significatif entre ce groupe et la 7^{ème} catégorie (7,25).

Néanmoins Curium explique les limites de cette étude des interactions par couple de 2 catégories, qui ne prend pas en compte notamment :

- Les quantités de déchets dans la mine ;
- La probabilité de contact des espèces chimiques ;
- Les réactions préférentielles entre les différents couples d'interactions ;
- Les réactions en chaîne multi-catégories etc...

Sur ces bases, Curium relativise alors l'intérêt de déstocker les sels de trempes cyanurés et non cyanurés.

Pour les premiers, leur impact est lié en partie à leur contenu en CN. L'Ineris a mis en avant le fait que la présence concomitante de Hg, Cd et CN pouvait induire une solubilité plus élevée de Hg et Cd ; le retrait du Hg pouvant également accentuer la mobilité du Cd par la « libération » d'une quantité disponible de CN et leur complexation avec le Cd. En l'absence de données bibliographiques complètes sur ces phénomènes de complexation, Curium n'a pu estimer les quantités qui seraient produites en complexes cyanurés de cadmium et de mercure. Quoiqu'il en soit, par la prise en compte des quantités relatives en ces 3 espèces chimiques, et en considérant les formations et solubilisations totales des complexes, Curium estime une augmentation du tonnage de cadmium pouvant être solubilisé de 12,2 % à 14,5 %. Cette augmentation de 2,3 % ne nous semble pas significative, ni représenter un impact environnemental.

Les deux catégories de sels de trempes contiennent également des nitrites et nitrates pouvant produire une augmentation de la solubilité de l'ensemble des métaux lourds et métaux de transition présents dans la mine. En prenant en compte les quantités de métaux quantifiées dans la mine comparativement à celles de nitrites-nitrates ainsi que des hypothèses majorantes, Curium estime une potentielle augmentation de la fraction solubilisée de ces métaux de l'ordre de 10%. Nous pouvons conclure à un impact global faible. Les nitrites-nitrates réagiront vraisemblablement indistinctement sur le fer (non quantifié mais présent dans les déchets), le zinc, le plomb, ou encore le mercure et le cadmium.

En conclusion, le déstockage des sels de trempes cyanurés et non cyanurés n'est pas retenu comme pertinent, d'autant plus dans le cas de retrait de Cd et Hg et même si le retrait de Cd reste partiel (fraction contenue dans le bloc B15, non déstockable).

3.3. Proposition du scénario S4

3.3.1. Comparaison des deux approches et conclusions

La méthodologie de l'Ineris conduit à retenir comme substances pertinentes à déstocker : Hg, Cd, Cr.

L'approche développée par Curium conclut au déstockage des 4 catégories :

- Déchets chromiques (C4 ; Cr) ;
- Déchets arséniés (B3 ; As) ;
- Produits phytosanitaires (B10, As) ;
- Déchets mercuriels (B5, Hg).

Le Cd n'étant pas considéré par cette méthode comme représentatif d'une catégorie de déchet, il n'apparaît pas nominativement. Néanmoins il est présent dans les déchets arséniés qui figurent au classement. L'intérêt de déstocker le Cd, proposé par l'Ineris, est confirmé par Curium, compte tenu du caractère connu très soluble de ses sels.

Pour Hg et Cr, les deux approches se rejoignent.

La méthodologie de l'Ineris, mettant en jeu des modélisations complexes, est estimée la plus fiable. **Nous retenons donc le déstockage de Hg, Cd, Cr en scénario S4.** En parallèle à cette étude, des essais sont conduits en laboratoire pour apporter des éléments complémentaires quant au potentiel de solubilisation des formes d'As présentes dans les déchets. Quoiqu'il en soit, le déstockage de As est lié à celui de Cd (cf paragraphes suivants). **Pour préciser le scénario S4, la priorité sera bien donnée au retrait de Hg, Cd et Cr. Néanmoins il sera envisagé de déstocker des déchets supplémentaires afin de viser une quantité d'As retirée optimale.**

3.3.2. Méthodologie de sélection des déchets à déstocker

3.3.2.1. Approche par catégories de déchet

A partir du fichier Excel « Détail des masses élémentaires » décrit au paragraphe 3.4.3 du rapport [3], nous avons étudié la répartition des éléments ciblés (Hg, Cd, Cr et As) dans les catégories de déchets et par bloc de stockage.

Cette base de données regroupe en effet la masse élémentaire estimée de chaque colis présent dans la mine. Elle permet d'avoir tous les détails de chaque colis de déchet et permet également de réaliser des bilans par tableaux croisés dynamiques.

Pour chaque élément, nous avons produit un tableau récapitulatif des masses comprises dans chaque catégorie de déchet et chaque bloc. Ces tableaux sont versés en Annexe II.

Les masses comprises dans le bloc 15 ne pourront faire l'objet d'un retrait ; elles sont donc considérées comme non déstockables. Nous distinguerons alors les quantités d'éléments déstockables, des quantités totales dans la mine, dans la suite de l'étude.

A partir de ces tableaux, nous avons identifié les catégories de déchet renfermant les masses déstockables les plus élevées des éléments ciblés. La synthèse des résultats figure dans le Tableau 1.

	Masse Hg (T)	Masse Cr (T)	Masse Cd (T)	Masse As (T)
Masse Totale StocaMine	1,288	30,484	32,651	1721,545
Masse Déstockable (Totale hors B15)	1,283	29,831	20,639	1720,808
% masse déstockable /totale	99,6%	97,9%	63,2%	99,96%
B5 Déchets mercuriels	0,761	0,004	0,034	0,0159
B6 Terres polluées et résidus pollués par métaux lourds	0,011	9,614	0,267	5,400
C4 Déchets chromiques	0,004	8,984	0,009	0,077
B3 Déchets arséniés	0,179	3,169	18,022	1711,714
D12 Déchets de laboratoire	0,189	0,011	0,060	1,098
C8 Déchets de galvanisation	0,006	2,267	0,101	0,034
Masse Totale	1,150	24,049	18,493	1718,339
% masse toutes catégories/déstockable	89,6%	80,6%	89,6%	99,9%
% masse toutes catégories /totale	89,3%	78,9%	56,6%	99,8%

Tableau 1 : Synthèse des masses élémentaires déstockables par catégorie de déchet

Pour le Hg, Cr et As, les quantités déstockables sont proches des masses totales présentes dans la mine (pourcentage de retrait compris entre 98 et 100%). En revanche pour le Cd, une fraction importante de 12 tonnes, présente dans le bloc 15, sera exclue du scénario. Ainsi le pourcentage de retrait maximum du Cd ne pourra dépasser 63,2%.

Le Hg est majoritairement présent dans les déchets mercuriels. Les déchets arséniés et les déchets de laboratoire en contiennent également.

Le Cr se répartit principalement dans les déchets chromiques et les terres polluées. Les déchets arséniés et les déchets de galvanisation en contiennent également des quantités non négligeables.

Le Cd est très majoritairement concentré dans les déchets arséniés, qui contiennent également l'As.

Les 6 catégories de déchet récapitulées dans ce tableau regroupent bien les quantités les plus élevées des 4 éléments, en atteignant, par rapport à la masse totale dans la mine, des pourcentages de 57 % pour le Cd (contre 63 % maximum), 79 % pour le Cr, 89 % pour le Hg et 100% pour l'As.

Par conséquent le déstockage total de ces 6 catégories de déchet correspondrait à des taux de retrait élémentaires compris entre 81% et 100% des quantités déstockables ; les effets concomitants du déstockage multiple de différentes catégories ont été pris en compte dans ces estimations.

3.3.2.2. Approche par CAP

La caractérisation des déchets présentée dans le rapport [3] montre la variabilité des teneurs élémentaires en fonction des déchets au sein d'une même catégorie, ainsi que des tonnages de déchet équivalents très variables. Nous avons alors recherché les masses élémentaires les plus élevées en Hg, Cr, Cd, dans chaque catégorie identifiée par la première approche et identifié les CAP correspondants.

Pour l'As (degré de priorité moindre comparativement à Hg, Cd, Cr), nous avons pris en compte les CAP des déchets arséniés induits par les 3 autres éléments ciblés en ajoutant les CAP contenant des quantités non négligeables d'As ainsi qu'une autre catégorie de déchet (produits phytosanitaires) qui le renferme également.

L'ensemble des résultats de cette recherche est regroupé en Annexe III.

Une synthèse est présentée dans le Tableau 2.

Dans la première partie du tableau (en haut à gauche), apparaît la masse totale élémentaire de l'ensemble des CAP identifiés d'une catégorie de déchet, par paramètre de recherche.

A titre d'exemple, les CAP retenus parmi la catégorie Déchets mercuriels, comme contenant des masses majoritaires de Hg, représentent un total de 0,76 tonne de Hg. Pour les déchets arséniés, le tableau regroupe les quantités correspondantes aux CAP sélectionnés à partir des paramètres Cr, Cd, Hg, leur somme ainsi que la masse totale des CAP retenus sur le critère As et des produits phytosanitaires. Ces deux dernières quantités sont considérées comme opportunités de déstockage, contrairement aux précédentes qui caractérisent la version de base.

Catégorie de déchet		Elément recherché	Masse Hg (T)	Masse Cr (T)	Masse Cd (T)	Masse As (T)	Scénario S4	Nombre colis	Nombre colis Total	Proportion en colis	Tonnes	Tonnes Totales	Proportion en Tonnes
B5	Déchets mercuriels	Hg	0,7610	0,004	0,034	0,016	Base	179	209	86%	101,04	129,71	78%
D12	Déchets de laboratoire	Hg	0,1889	0,011	0,060	1,098	Base	62	187	33%	50,54	153,28	33%
B3	Déchets arséniés	Cd	0,1096	0,445	17,951	1540,820	Base	5468			5963,54		
B3	Déchets arséniés	Cr	0,0049	2,665	0,001	3,640	Base	119			56,55		
B3	Déchets arséniés	Hg	0,0631	0,025	0,034	89,485	Base	463			312,71		
B3	Déchets arséniés -Total		0,1776	3,1353	17,9865	1633,9459	Base	6050	6993	87%	6332,80	6871,37	92%
C4	Déchets chromiques	Cr	0,0040	8,984	0,009	0,077	Base	358	358	100%	428,81	428,81	100%
B6	Terres polluées et résidus pollués par métaux lourds	Cr	0,0094	9,0910	0,2192	4,0074	Base	802			703,30		
B6	Terres polluées et résidus pollués par métaux lourds	As	0,0005	0,046	0,02797	1,1779	Base	766			995,46		
B6	Terres polluées et résidus pollués par métaux lourds - Total		0,0099	9,1366	0,2472	5,1853	Base	1568	4454	35%	1698,77	5176,92	33%
C8	Déchets de galvanisation	Cr	0,0062	2,236	0,09338	0,0314	Base	471	548	86%	537,39	596,97	90%
B3	Déchets arséniés	As	0,0011	0,032	0,03578	77,0479	Opportunité	801	6993	11%	483,75	6871,37	
B10	Produits phytosanitaires	As	non mesuré	non mesuré	non mesuré	1,5580	Opportunité	19	19	100%	8,22	8,22	100%
Total Base			1,148	23,506	18,430	1640,353							
% masse S4 Base /déstockable			89,5%	78,8%	89,3%	95,3%							
Total avec Opportunités			1,149	23,538	18,465	1718,959							
% masse S4 avec Opportunités /déstockable			89,5%	78,9%	89,5%	99,9%							
Rappel tableau 1 : % masse toutes catégories/déstockable			89,6%	80,6%	89,6%	99,9%							
% masse S4 Base /Total			89,1%	77,1%	56,4%	95,3%							
% masse S4 avec Opportunités /Total			89,2%	77,2%	56,6%	99,8%							
Rappel tableau 1 : % masse toutes catégories /totale			89,3%	78,9%	56,6%	99,8%							
S4 Base en cumul avec déstockage 2014-2017			99,5%	78,0%	56,8%	95,4%							
S4 avec Opportunités et cumul avec déstockage 2014-2018			99,5%	78,1%	56,9%	99,9%							

Tableau 2 : Synthèse des masses élémentaires déstockables majoritaires au sein des catégories de déchet

L'addition des masses élémentaires correspondant à chaque ensemble de CAP identifiés dans les 6 catégories sélectionnées : déchets mercuriels, de laboratoire, arséniés, chromiques, de galvanisation et terres polluées conduit aux résultats indiqués dans la deuxième partie du tableau (en bas à gauche).

Comparativement à la première approche, la sélection des CAP de la version de base équivaut au retrait de :

- 89,5% du Hg déstockable (contre 89,6% par la prise en compte de la catégorie entière) ;
- 78,8% du Cr (contre 80,6%) ;
- 89,3% du Cd (contre 89,6%) ;
- 95,3% de As (contre 99,9%).

Cette méthodologie permet donc d'atteindre des taux de réduction élémentaires proches ou même équivalents au déstockage total de ces 6 catégories.

La prise en compte des quantités identifiées comme opportunités permettrait d'augmenter ce ratio à 99,9% pour l'As, sans incidence significative sur les 3 autres éléments.

Nous retenons donc cette méthode pour définir le scénario S4 et ses résultats comme objectifs de déstockage.

Dans la troisième partie du tableau (en haut à droite), sont notées les quantités de déchet correspondantes à chaque ligne, exprimées en nombre de colis et en tonnes de déchet, par rapport aux totaux de la catégorie. Pour reprendre l'exemple de la première ligne du tableau, la masse de 0,76 tonne de Hg des CAP retenus dans la catégorie Déchets mercuriels correspond à 179 colis sur 209 (soit 86%) que contient cette catégorie et 101 tonnes de déchet sur un total de 130 tonnes (soit 78%).

Ainsi la sélection de CAP permet de réduire le nombre de colis et le tonnage à déstocker pour un taux de retrait équivalent.

Cette méthode permet principalement de réduire considérablement le nombre de colis à retirer contenant du Cr comparativement au retrait de toutes les terres polluées. En effet par ce scénario de déstockage qui implique seulement 35% du nombre de colis de terres polluées et 33% en tonnes, nous atteignons un taux de diminution du Cr équivalent au déstockage de l'ensemble des colis.

Cela permet également de réduire les opérations de déstockage aux déchets les plus concentrés parmi les déchets de laboratoire.

Lors de l'étude logistique de déstockage, si les colis correspondants aux opportunités se trouvent dans le cheminement du déstockage de la version de base, il pourra alors être envisagé de les retirer également afin de tendre vers un taux de réduction d'As supérieur.

Au bilan, comparativement aux masses totales élémentaires présentes dans la mine, le scénario S4 ainsi défini, correspond au retrait de :

- **89,1% du Hg ;**
- **77,1% du Cr ;**
- **56,4% du Cd ;**
- **95,3% de As.**

En cumulé avec les opérations de déstockage menées de 2015 à 2017 (95% de Hg), le taux de déstockage du Hg atteint au total 99,5%.

3.3.2.3. Expression du scénario S4 en tonnage de catégories de déchet – Traçabilité des filières d'élimination

Les tonnages de déchets à déstocker selon le scénario S4 sont regroupés dans le Tableau 3 :

- Tonnages équivalents de déchets des différentes catégories, pour un total de 9149 tonnes en version de base (soit 23% du tonnage total en stock hors B15) ;
- Ainsi que les tonnages supplémentaires correspondant aux opportunités, pour un total de 492 tonnes, ce qui élèverait le total à déstocker à 9641 tonnes (soit 24% du tonnage total en stock hors B15).

Catégorie de déchet		Tonnage S4 Base	Tonnage S4 Base Détail	Tonnage Opportunités S4	Tonnage Total	Filière			
A1	Sels de trempe				2026,67	Stockage profond mines de sel			
A2	Sels de trempe non cyanurés				1191,26	Stockage profond mines de sel			
B10	Produits phytosanitaires non organiques			8,22	8,22	Stockage profond mines de sel			
B3	Déchets arséniés	6332,8	6321,28	483,75	6843,29	Stockage profond mines de sel			
B5	Déchets mercuriels	101,04	101,04		101,04	Stockage profond mines de sel			
					28,67	ISDD (Laimont)			
B6	Terres polluées et résidus pollués par métaux lourds				1657,84	ISDD			
					1686,56	470,51		544,1	ISDD
								2,7	ISDD
						1197,41		2561,07	ISDD
								25,45	Resolest
							18,64	89,18	Incinération spécialisée en filière directe
								284,33	Stockage profond mines de sel
		12,21	12,21		12,21	Stockage profond mines de sel			
C4	Déchets chromiques	428,81	428,81		428,81	Stockage profond mines de sel			
C8	Déchets de galvanisation, rétentat de filtration	537,39	537,39		559,91	ISDD			
					30,29	Stockage profond mines de sel			
D12	Déchets de laboratoire	50,54	50,54		92,85	Incinération spécialisée PCB			
					50,54	Stockage profond mines de sel			
D7	Résidus de l'industrie (de l'électronique)				9,88	ISDD			
					126,89	Stockage profond mines de sel			
						332,00	ISDD		
						133,5	ISDD		
	Déchets générés pdt déstockage				27,20	Préparation de charge pour cimenterie			
						8,92	ISDD (Laimont)		
						3335,15	ISDD (Laimont)		
E13	Déchets amiantés				19757,5	ISDD			
E9	Résidus d'incinération de déchet				77,9	Incinération spécialisée en filière directe			
	Filtres souillés (extraits de A1, A2, B3 et C8)								
TOTAL		9149,348	9149,348	491,967	40369,87				
Total à déstocker S2					40369,9	100 % hors B15			
Total à déstocker S3					16775,6	42 % hors B15			
Total à déstocker S4 Base					9149,35	23 % hors B15			
Total à déstocker S4 avec Opportunités					9641,32	24 % hors B15			

Tableau 3 : Tonnages du scénario S4 – Comparaison aux tonnages des autres scénarios

De par les volumes et natures de déchets impliqués, le scénario S4 représente bien réellement une alternative aux scénarios S2 ou S3, en réduisant d'un facteur 2 à 4 les tonnages déstockés.

Exprimés en retrait d'un nombre de colis, ce scénario correspond à 14% de déstockage, soit 7 fois moins que S2 (cf Tableau 4).

	Nombre de colis	
Total à déstocker S2	63429	100 % hors B15
Total à déstocker S3	16335	26 % hors B15
Total à déstocker S4 Base	8688	14 % hors B15
Total à déstocker S4 avec Opportunités	9505	15 % hors B15

Tableau 4 : Proportions de colis déstockés par scénario

Afin de conserver la traçabilité des filières d'élimination identifiées dans l'étude du volet 1 ([3]), nous avons détaillé dans le Tableau 3, les tonnages de déchets du scénario S4 par filière d'élimination. Ces éléments ont fait l'objet de l'actualisation du rapport du volet 1 ([3]).



ANNEXES

- Annexe I : Rapport d'étude Curium - Définition du scénario de déstockage S4
- Annexe II : Répartition des masses élémentaires par catégorie de déchet et par bloc
- Annexe III : Recherche des masses élémentaires prépondérantes – Identification des CAP

Annexe I : **Rapport d'étude Curium – Définition du scénario de déstockage S4**

Client : ANTEA GROUP

Représenté par : Stéphanie DUGENEST

Offre CURIUM n° 1912 — ANT04 v2

Définition du scénario de déstockage S4
« Déstockage des déchets pertinents pour limiter
l'impact sur l'environnement »
Site MDP A à Wittelsheim
Rapport



Rédaction	Vérification	Approbation
Benjamin DOUCHE	Thierry BARRAS	Nicolas POUYAU

Date	Nature de la modification	Version
12/02/2020	Création du document	1
13/02/2020	Mise à jour suivant les remarques d'ANTEA	2
04/03/2020	Mise à jour suivant les remarques d'ANTEA	3
20/03/2020	Mise à jour suivant les remarques d'ANTEA	4
17/04/2020	Mise à jour suivant les remarques d'ANTEA	5
05/05/2020	Mise à jour suivant les remarques d'ANTEA	6

Table des matières

Table des matières	2
I. Introduction.....	9
II. Analyse critique de la méthodologie de l'INERIS de définition du terme source	10
1 Que conclut l'INERIS ?	11
2 Analyse des données d'entrée des modèles de définition du terme source	12
3 Incertitude liée aux échantillons	15
4 Les modèles utilisés pour la définition du terme source	15
5 Le facteur de sécurité et l'étude d'impact	15
6 Conclusion	17
III. Elaboration d'une matrice d'interaction entre classes de déchets et d'une classification.....	18
1 Elaboration de la matrice	18
a Etape 1 : Listage de l'ensemble des molécules présentes dans chacune des classes de déchets issus des FID.....	18
b Etape 2 : Simplification du nombre de combinaisons d'interactions possibles	18
c Etape 3 : Détermination des interactions entre chaque couple d'espèces chimiques	20
2 Classification en fonction des interprétations des résultats de la matrice	22
a Hiérarchisation 1 : Somme des impacts	23
b Hiérarchisation 2 : Somme des impacts positifs	23
c Hiérarchisation 3 : Somme des impacts négatifs	24
d Hiérarchisation 4 : Somme des impacts avec pondération.....	24
e Tendance de hiérarchisation	25
3 Remarques spécifiques sur les classes A1 – Sels de trempe et A2 – Sels de trempe non cyanurés	25
a Impact du cyanure présent dans la classe de déchets A1 – Sels de trempe.....	25
b Impact des nitrites et nitrates de la classe de déchets A1 – Sels de trempe et A2 – Sels de trempe non cyanurés	26
4 Limites / Incertitudes des résultats de hiérarchisation CURIUM	27
5 Conclusion	28
IV. Conclusion générale	29
V. Annexe.....	31
Annexe I : Interactions entre les espèces chimiques.	31

Table des illustrations

<i>Tableau 1: concentration en g/l du terme source défini par l'INERIS.....</i>	11
<i>Tableau 2 : Proportion d'arsenic en fonction du degré d'oxydation dans les classes B3 et B10.....</i>	13
<i>Tableau 3 : Proportion d'arsenic en fonction de leur degré d'oxydation dans les classes B3 et B10</i>	13
<i>Tableau 4: solubilité de l'arsenic sous forme trioxyde et arséniate de calcium</i>	13
<i>Tableau 5 : Facteur de sécurité vis-à-vis du critère de qualité réglementaire pour le Scénario retrait 93%</i>	16
<i>Tableau 6 : Facteur de sécurité vis-à-vis du critère de qualité "environnement local témoin" pour le Scénario retrait 93%</i>	16
<i>Tableau 7 : Espèces chimiques sélectionnées par classe de déchets.....</i>	19
<i>Tableau 8: Matrice des effets d'interactions entre les classes de déchets avec les composés choisis..</i>	21
<i>Tableau 9 : matrice simplifiée</i>	22
<i>Tableau 10: hiérarchisation par somme des impacts positifs et négatifs</i>	23
<i>Tableau 11: hiérarchisation par somme des impacts positifs</i>	23
<i>Tableau 12: hiérarchisation par somme des impacts négatifs.....</i>	24
<i>Tableau 13: hiérarchisation par somme des impacts avec pondération.....</i>	24
<i>Tableau 14: moyenne et classement des classes de déchets impactant négativement le stockage</i>	25
<i>Tableau 15 : Impact sur le cadmium dans le cas du retrait total du mercure.....</i>	26
<i>Tableau 16 : Impact des nitrites/nitrates sur les métaux lourds</i>	27

Résumé non technique

ANTEA, attributaire du marché d'étude de faisabilité d'un déstockage complémentaire des déchets enfouis dans la mine de Wittelsheim, sollicite CURIUM pour évaluer le scénario de déstockage S4, intitulé « déstockage des déchets pertinents pour limiter l'impact sur l'environnement ».

Dans un premier temps, CURIUM a effectué une analyse critique de la méthodologie INERIS dont le but est la définition du terme source, puis l'identification et la hiérarchisation des espèces chimiques pertinentes à déstocker (exemple : Cadmium, Chrome, Cyanure, etc...). Le terme source est dans le cas présent, la composition chimique de la saumure présente dans le stockage (StocaMine) suite à l'ennoyage des vides miniers.

Dans un deuxième temps, CURIUM a réalisé une étude d'interaction entre classes de déchets dans les blocs. Il s'agissait d'adopter une approche différente de celle de l'INERIS afin de la compléter. L'impact positif ou négatif sur l'environnement des différentes interactions entre classes de déchets de la mine va définir une hiérarchisation des classes des déchets pertinentes à déstocker.

ANALYSE CRITIQUE DE LA METHODOLOGIE DE L'INERIS DE DEFINITION DU TERME SOURCE

Le terme source est la composition chimique de la saumure présente dans le stockage (StocaMine) suite à l'ennoyage des vides miniers. Le terme source est donc un mélange composé à la fois de la saumure et des déchets enfouis dans la mine.

Suite au déstockage partiel des déchets mercuriels, effectué entre 2014 et 2017, l'INERIS a réévalué, dans son étude datant du 01/06/2016, la composition chimique du terme source. La hiérarchisation des éléments chimiques par ordre décroissant des concentrations des éléments est : chrome, cadmium, cyanure, mercure, cobalt, nickel, antimoine, arsenic, baryum, cuivre, plomb.

L'INERIS a utilisé le code de calcul Visual MINTEQ pour déterminer le terme source. Visual MINTEQ est un modèle d'équilibre chimique pour le calcul de la spéciation des métaux, des équilibres de solubilité, de la sorption, etc... pour les eaux naturelles. Pour le fonctionnement de ce code de calcul, il est impératif d'incorporer des données d'entrée, et notamment les éléments chimiques et leur concentration. Bien que CURIUM soit en accord avec la majorité des données utilisées, nous avons noté une incertitude concernant les déchets arséniés et plus particulièrement les molécules d'arsenic utilisées comme représentantes de la classe B3 (déchets arséniés) et B10 (produits phytosanitaires). En effet l'INERIS a considéré l'arséniate de calcium comme molécule représentative des classes de déchets arséniés alors que d'après les FID (Fiche d'Identification de Déchet des producteurs), le trioxyde d'arsenic As(III) représente environ 52% des déchets arséniés, et l'arséniate As(V) 42%. D'après ces informations, le comportement des déchets arséniés peut s'en trouver modifié du fait de la différence de solubilité des deux molécules. Le trioxyde d'arsenic As(III) est plus soluble que l'arséniate As(V). De plus, les milieux alcalins augmentent la solubilité du trioxyde d'arsenic As(III) par formation d'ion arsénite très soluble.

Le retour d'expérience de CURIUM sur des déchets d'arsenic en général montre que pour traiter l'eau contenant des sels d'arsenic (III), le procédé est d'oxyder As (III) en As (V) par chloration pour augmenter son insolubilité. Un autre retour d'expérience montre que le trioxyde d'arsenic n'est pas accepté en ISDD (Installation de Stockage de Déchets Dangereux) même avec un traitement de

stabilisation/solidification. En effet, le trioxyde d'arsenic reste toujours mobile même s'il est stabilisé avec des liants hydrauliques.

L'arsenic pourrait avoir un impact beaucoup plus important sur le terme source. La chimie de l'arsenic étant complexe et les données bibliographiques assez fragmentaires, seules des modélisations voire des essais pourraient permettre d'aller plus loin sur le sujet.

L'INERIS a également évalué l'impact potentiel du terme source sur la nappe phréatique d'Alsace se trouvant au-dessus du stockage et a comparé les résultats aux différentes valeurs suivantes :

- Valeurs locales témoins : ces valeurs permettent de déterminer si la saumure sortante modélisée dénaturera ou non la nature chimique de l'eau ;
- Valeurs réglementaires : notamment celle de l'Arrêté du 11 janvier 2007 relatif aux limites de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine, toujours en vigueur.

Au vu des facteurs de sécurité obtenus, les éléments les plus contraignants pour la nappe phréatique seraient, dans l'ordre : le trio mercure / cadmium / chrome, puis le cyanure, l'antimoine et l'arsenic.

Cependant, l'INERIS mentionne que « dans l'hypothèse d'un transport de saumure contaminée au bout de 1000 ans, les concentrations en contaminants à la sortie des puits seraient bien plus faibles que les valeurs réglementaires actuelles ». L'INERIS conclut donc à l'absence de danger pour l'environnement et pour la population quand la saumure sortira de la mine.

ELABORATION D'UNE MATRICE D'INTERACTION ENTRE CLASSES DE DECHETS ET D'UNE CLASSIFICATION

Afin de compléter les études antérieures et d'apporter un point de vue différent sur la définition du scénario S4, nous avons raisonné non pas par élément (Hg, Cd, Cr, etc...) mais par classe de déchets présents dans la mine. Il s'agit donc, ici, d'une étude d'interaction entre les classes de déchets stockés dans les blocs. Le but est de vérifier les effets positifs ou négatifs d'une typologie de déchet par rapport à une autre, suite à l'envoyage du stockage par une saumure saturée. La classe D13 – Déchets amiantés n'a pas été prise en compte dans la matrice, car c'est une classe de déchet inerte qui n'aura aucune interaction avec les autres classes de déchets ; il en va de même pour les déchets de chantier générés pendant le dernier déstockage.

La méthodologie d'élaboration de la matrice d'interaction est la suivante :

- Etape 1 : Listage qualitatif de toutes les espèces chimiques constituant chaque classe de déchets à partir des informations disponibles dans les FID (Fiches d'identification de Déchet).
- Etape 2 : Sélection sur le plan quantitatif, à partir des données de la tierce expertise ARTELIA/K-UTEC du 02/05/2016, des 2 espèces chimiques les plus représentatives de chaque classe de déchets afin de limiter le nombre d'interaction possible dans la matrice (ici 181 combinaisons).
- Etapes 3 et 4 : Détermination des interactions entre chaque couple d'espèces chimiques. La recherche des interactions est basée sur l'expérience professionnelle de CURIUM, mais également sur de la recherche bibliographique. CURIUM a étudié les différentes réactions chimiques entre les espèces, les changements de solubilité, les réactions d'oxydo-réduction,

les dégagements gazeux, les réarrangements ioniques. Ces interactions sont codifiées de la façon suivante :

- +1 : effet positif
- 0 : effet neutre
- -1 : effet négatif

Ci-après la matrice des interactions :

	A1 - Sels de Trempe	A2 - Sels de trempe non cyanurés	B3 - Déchets arséniés	B5 - Déchets mercuriels	B10 - Produits phytosanitaires	C4 - Déchets chromiques	C8 - Déchets de galvanisation	D7 - Résidus de l'industrie	D12 - Déchets de laboratoire	E9 - Résidu d'incinération	B6 - Terre polluée
A1 - Sels de Trempe		0	-1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1
A2 - Sels de trempe non cyanurés	0		0	-1	0	0	0	-1	-1	+1	0
B3 - Déchets arséniés	-1	0		+1	0	-1	-1	+1	+1	+1	0
B5 - Déchets mercuriels	-1	-1	+1		+1	-1	0	0	+1	+1	0
B10 - Produits phytosanitaires	-1	0	0	+1		-1	-1	+1	+1	+1	0
C4 - Déchets chromiques	+1	0	-1	-1	-1		+1	+1	0	0	0
C8 - Déchets de galvanisation	+1	0	-1	0	-1	+1		+1	+1	0	+1
D7 - Résidus de l'industrie	-1	-1	+1	0	+1	+1	+1		+1	+1	0
D12 - Déchets de laboratoire	-1	-1	+1	+1	+1	0	+1	+1		+1	0
E9 - Résidu d'incinération	+1	+1	+1	+1	+1	0	0	+1	+1		+1
B6 - Terre polluée	+1	0	0	0	0	0	+1	0	0	+1	

Classification des classes de déchets

La matrice permet de mettre en évidence les influences positives et négatives des classes de déchets les unes par rapport aux autres. Cela nous a permis de proposer une hiérarchisation des classes de déchets basée sur leur impact positif ou négatif entre elles.

Il est possible d'avoir des approches différentes, suivant que l'on privilégie l'aspect positif ou négatif d'une classe de déchets. Nous avons effectué 4 types de classification selon les critères suivants :

- Somme des impacts,
- Somme des impacts positifs,
- Somme des impacts négatifs,
- Somme des impacts en doublant les effets négatifs.

Le classement final présenté page suivante, est une moyenne des positions des classes de déchets dans les 4 classements :

Classement final CURIUM	Classe de déchets	Classement moyen de chaque classe
1	A2 – Sels de trempe non cyanurés	1,50
2	A1 – Sels de Trempe	2,00
3	C4 – Déchets chromiques	2,50
4	B3 – Déchets arséniés	3,50
4	B10 – Produits phytosanitaires	3,50
4	B5 – Déchets mercuriels	3,50
7	C8 – Déchets de galvanisation	7,25
8	D12 – Déchets de laboratoire	8,00
8	D7 – Résidus de l'industrie	8,00
10	B6 – Terre polluée	8,25
11	E9 – Résidus d'incinération	10,75

Le résultat donne une tendance de hiérarchisation du potentiel d'influence des classes de déchets. Même s'il est possible d'avoir des résultats différents selon la pondération choisie dans la grille de hiérarchisation, une tendance se dégage, avec un groupe de classe de déchets qui arrive systématiquement en tête des classes les plus négatives sur le stockage. Il s'agit des classes A2 - Sels de trempe non cyanurés, A1 – Sels de trempe, C4 – Déchets chromiques, B3 – Déchets arséniés, B10 – Produits phytosanitaires et B5 – Déchets mercuriels. Ces 6 classes sont en effet comprises dans un intervalle faible de cotation moyenne (de 1,5 à 3,5) ; il existe ensuite un écart significatif entre ce groupe et la 7^{ème} classe (7,25).

Cependant, cette matrice des interactions a ces propres limites et incertitudes. Elle prend en compte uniquement les interactions chimiques par couple de classes et non le mélange de l'ensemble des classes avec la saumure issue de la mine. D'autres variables ne sont pas prises en compte notamment :

- Les quantités de déchets dans la mine,
- La probabilité de contact des espèces chimiques,
- Les réactions préférentielles entre les couples d'interactions,
- Les réactions en chaîne multi-catégories,
- Etc. ...

Sur cette base, le classement final est à relativiser. Pour les deux premiers du classement, les sels de trempe cyanurés et non cyanurés, si d'autres paramètres sont pris en compte, l'impact négatif peut être revu.

Pour la classe de déchets A2 – Sels de trempe, l'impact est lié en partie à la présence de cyanure. L'INERIS a mis en avant le fait que la présence concomitante de mercure, cadmium et cyanure pouvait induire une solubilité plus élevée du mercure et du cadmium ; L'hypothèse d'un scénario de retrait du mercure pouvant également accentuer la mobilité du cadmium par la « libération » d'une quantité disponible de cyanure et leur complexation avec le cadmium. En l'absence de données bibliographiques complètes sur la complexation, il n'a pas été possible d'évaluer la quantité produite de complexe cyanuré de cadmium et de mercure. Quoi qu'il en soit, par la prise en compte des quantités relatives de ces 3 espèces chimiques, et en estimant que la totalité des cyanures allait former des complexes solubles de cadmium et de mercure, le retrait du mercure allait entraîner une augmentation de la solubilité possible du cadmium de 12,2% à 14,5%.

Les deux classes de sels de trempe contiennent également des nitrites et nitrates pouvant produire une augmentation de la solubilité de l'ensemble des métaux lourds et métaux de transition présents dans la mine. En comparant les quantités de métaux contenues dans les classes de déchets, avec les nitrites-nitrates et en appliquant les hypothèses majorantes, l'augmentation potentielle de la fraction solubilisée de ces métaux est de l'ordre de 10% au maximum. Les nitrites-nitrates réagiront vraisemblablement indistinctement sur le fer (non quantifié mais présent dans les déchets), le zinc, le plomb, ou encore le mercure et le cadmium.

I. Introduction

ANTEA, attributaire du marché d'étude de faisabilité d'un déstockage complémentaire des déchets enfouis dans la mine de Wittelsheim, sollicite CURIUM pour évaluer le scénario de déstockage S4, intitulé « déstockage des déchets pertinents pour limiter l'impact sur l'environnement ».

Dans un premier temps, CURIUM a effectué une analyse critique de la méthodologie INERIS de définition du terme source, afin d'identifier et de hiérarchiser les espèces chimiques pertinentes à déstocker (exemple : Cadmium, Chrome, Cyanure, etc...). Le terme source est dans le cas présent, la composition chimique de la saumure présente dans le stockage (StocaMine) suite à l'envoyage des vides miniers.

Dans un deuxième temps, CURIUM a réalisé une étude d'interaction entre classes de déchets dans les blocs. Il s'agissait d'adopter une approche différente afin de compléter la hiérarchisation (basée sur le terme source) des espèces chimiques pertinentes à déstocker proposée par l'INERIS. L'impact positif ou négatif sur l'environnement des différentes interactions entre classes de déchets de la mine va définir une hiérarchisation des classes des déchets pertinentes à déstocker.

La hiérarchisation des espèces chimiques de l'INERIS et la hiérarchisation des classes de déchets de CURIUM ne sont pas comparables car les deux méthodologies sont très différentes. Cependant ces deux hiérarchisations sont une aide à la définition du scénario de déstockage S4.

II. Analyse critique de la méthodologie de l'INERIS de définition du terme source

Le terme source est la composition chimique de la saumure présente dans le stockage (StocaMine) suite à l'ennoyage des vides miniers. Le terme source est donc un mélange composé à la fois de la saumure et des déchets enfouis dans la mine.

La méthodologie INERIS de définition du terme source est détaillée dans le rapport d'étude DRS-16-157108-05017, intitulé *Réponse aux sollicitations de l'autorité environnementale et du tiers expert* datant du 01/06/2016 (réf ANTEA [A7]) et dans les rapports associés (rapport d'étude INERIS datant du 3/11/2011 ou réf ANTEA [A56], etc...).

Pour plus de facilité, ce rapport d'étude sera nommé rapport d'étude INERIS du 01/06/2016 dans la suite de ce présent rapport.

Les sollicitations faites à l'INERIS, mentionnées en page 5 du rapport d'étude INERIS du 01/06/2016 sont les suivantes :

- Préciser la nouvelle composition du terme source suite à la réévaluation des quantités d'éléments issues des analyses des déchets réalisées dans le cadre de tierce expertise.
- Déterminer l'impact potentiel sur la nappe phréatique d'Alsace
- Faire une estimation des incertitudes

Pour répondre à ces questions, l'INERIS, dans son rapport d'étude du 01/06/2016 a suivi ces 4 étapes :

- Quantifier et déterminer le terme source (page 7)
- Évaluer la menace de ce terme source sur l'environnement (page 23)
- Suggérer une solution complémentaire, (la construction de barrage imperméable) (page 33)
- Réévaluer la menace du terme source avec cette solution (page 47).

L'analyse critique de CURIUM des études de l'INERIS portera sur la méthodologie de définition du terme source.

1 Que conclut l'INERIS ?

Le tableau 2 en page 8 du rapport d'étude INERIS du 01/06/2016 récapitule les concentrations en g/l du terme source calculées pour les 3 scénarios de déstockage suivants :

- Scénario avant déstockage : 0% de retrait de la masse de mercure en place
- Scénario dit « 93% » : retrait d'environ 93% (95% précisément selon l'inventaire 2016) de la masse de mercure originellement en place
- Scénario dit « 56% » : retrait d'environ 56% (57% précisément selon l'inventaire 2016) de la masse de mercure originellement en place

Élément	Scénario avant déstockage	Scénario dit « 93% »	Scénario dit « 56% »
Bi	Absent de l'inventaire 2016		
Ag	Absent de l'inventaire 2016		
Pb	2,1E-07	2,1E-07	2,1E-07
Cu	6,6E-07	1,3E-06	9,3E-07
Ni	7,2E-07	1,2E-03	1,2E-03
Ba	6,1E-06	5,6E-06	5,8E-06
Co	1,1E-05	2,2E-02	1,7E-03
As	4,5E-04	4,9E-04	4,7E-04
Sb	1,0E-03	1,0E-03	1,0E-03
Cd	2,3E-03	1,1E+00	9,1E-02
CN	7,7E-01	9,6E-01	8,7E-01
Hg	4,5E+00	2,8E-01	2,2E+00
Cr	5,6E+00	6,7E+00	6,1E+00

Tableau 1: concentration en g/l du terme source défini par l'INERIS

Avant le déstockage partiel, la hiérarchisation des éléments chimiques que l'on retrouve le plus dans le terme source est : Cr, Hg, CN, Cd, Sb, As, Co, Ba Ni, Cu, Pb (ordre décroissant des concentrations des espèces).

Cependant, le scénario qui nous intéresse ici est le scénario dit « 93% » correspondant à la situation actuelle, à savoir postérieure à la phase de déstockage de 93% de mercure. La hiérarchisation des éléments chimiques que l'on retrouve alors le plus dans le terme source est : Cr, Cd, CN, Hg, Co Ni, Sb, As, Ba, Cu, Pb (ordre décroissant des concentrations des espèces).

Dans ces 2 scénarios, les 4 premiers éléments (Cr, Cd, CN, Hg) sont identiques mais sont positionnés dans un ordre différent.

L'INERIS a également évalué l'impact potentiel du terme source sur la nappe phréatique d'Alsace se trouvant au-dessus du stockage et a comparé les résultats aux différentes valeurs suivantes :

- Valeurs locales témoins : ces valeurs permettent de déterminer si la saumure sortante modélisée dénaturera ou non la nature chimique de l'eau
- Valeurs réglementaires : notamment celle de l'Arrêté du 11 janvier 2007 relatif aux limites de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine, toujours en vigueur

L'INERIS mentionne en page 48 de son rapport d'étude du 01/06/2016 que « dans l'hypothèse d'un transport de saumure contaminée au bout de 1000 ans, les concentrations en contaminants à la sortie

des puits seraient bien plus faibles que les valeurs réglementaires actuelles ». Enfin l'INERIS conclut à l'absence de danger pour l'environnement et pour la population quand la saumure sortira de la mine.

2 Analyse des données d'entrée des modèles de définition du terme source

Dans son rapport d'étude du 01/06/2016 sur la modélisation du nouveau terme source post tierce expertise de K-UTEC du 02/05/2016, l'INERIS mentionne en page 7 « qu'en dehors des inventaires de déchets mis à jour avec les nouvelles données fournies par MDPA, les hypothèses de calcul du terme source pour chacun des trois scénarios sont identiques à celles retenues dans les travaux de Hennebert (2010) et de Hennebert et Quiot (2013). Cela signifie que l'INERIS garde les hypothèses de calcul du terme source définies dans son rapport d'étude n° DRC-10-108130-12610B du 03/11/2011.

En se référant à ce rapport de l'INERIS du 03/11/2011 cité précédemment, à la page 53 le code de calcul utilisé pour déterminer le terme source est celui de « Visual MINTEQ ». Pour le fonctionnement de ce code de calcul, il est impératif d'incorporer des données d'entrée, et notamment les éléments chimiques qui sont à déterminer. Bien que CURIUM soit en accord avec la majorité des données utilisées, nous avons noté une incertitude concernant les déchets arséniés et plus particulièrement les molécules d'arsenic utilisées comme représentantes de la classe de déchets arséniés.

CURIUM, de par son expérience acquise sur les déchets stockés dans la mine lors des travaux de déstockage partiel des déchets mercuriels menés entre 2014 et 2017, table sur une présence majoritaire de trioxyde d'arsenic.

L'INERIS, quant à elle, mentionne en page 56 de son rapport d'étude du 03/11/2011 que la solubilité de l'arsenic est évaluée à 15,4 mg/L en milieu salin concentré, solubilité fixée par un arséniate de calcium et de baryum.

L'arsenic étant le polluant le plus présent en quantité dans les déchets, CURIUM a étudié de manière plus approfondie le cas de l'arsenic dans les déchets arséniés de la classe B3 et dans les produits phytosanitaires de la classe B10, d'autant plus que l'INERIS rappelle dans son rapport n° DRC-12-108130-00744A du 19/04/2012, page 60, que les études antérieures réalisées par BMG avaient conclu que l'impact potentiel de l'arsenic serait prépondérant mais que cette conclusion n'a pas été confirmée par l'INERIS.

Cas spécifique de l'arsenic

En prenant connaissance de l'ensemble des FID (Fiches d'Identification de Déchet) de StocaMine, il apparaît que les déchets arséniés sont constitués, pour plus de la moitié, de trioxyde d'arsenic.

Les tableaux ci-après montrent les proportions d'arsenic en fonction de leur degré d'oxydation sur les classes de déchets B3 – Déchets arséniés et B10 – Produits phytosanitaires.

Classe de déchets	Degré*d'oxydation	Nombre de CAP	Masse** (T)
B3 – Déchets Arséniés	As (III)	20	3591,22
	As(V)	3	2879,20
	Mélange As (III)+As(V)	6	235,94
	As (forme non connue)	6	168,27
	Sous-Total	35	6874,62
B10-Produits phytosanitaires	As (III)	1	1,34
	Mélange As (III)+As(V)	2	6,88
	Sous-Total	3	8,22

Tableau 2 : Proportion d'arsenic en fonction du degré d'oxydation dans les classes B3 et B10

Degré d'oxydation	Masse (T)	Pourcentage
As (III)	3592,56	52,20 %
As(V)	2879,20	41,83 %
Mélange As (III)+As(V)	242,82	3,53 %
As (forme non connue)	168,27	2,44 %

Tableau 3 : Proportion d'arsenic en fonction de leur degré d'oxydation dans les classes B3 et B10

*Le degré d'oxydation de l'arsenic est celui indiqué dans les Fiches d'Identification de Déchet (FID). Ces fiches sont utilisées pour créer les Certificats d'Acceptation Préalable.

**Les masses indiquées sont les masses de déchets réceptionnées par StocaMine.

Il faut savoir que les FID ont également leurs degrés d'incertitude car ce sont des déclarations de la part des producteurs des déchets et que ces informations n'ont pas été confirmées par des analyses chimiques. Néanmoins, d'après ces informations, le comportement des déchets arséniés peut s'en trouver modifié du fait de la différence de solubilité des deux molécules (cf. Tableau 4).

	Trioxyde d'arsenic As_2O_3 Degré d'oxydation +3 (As(III))	Arséniate de calcium $Ca_3(AsO_4)_2$ Degré d'oxydation +5 (As(V))
Solubilité en g/l (Eau à 20°C)	37	0,13

Tableau 4: solubilité de l'arsenic sous forme trioxyde et arséniate de calcium

Les cations arsenic As(III) de degré d'oxydation +3 sont plus solubles que les cations d'arsenic As(V) de degré d'oxydation +5 d'après le Tableau 4 ci-dessus. Pour information, l'arséniate de calcium est un As (V) et le trioxyde d'arsenic est un As (III). De plus, les milieux alcalins augmentent la solubilité du trioxyde d'arsenic par formation d'ion arsénite très soluble.

Le retour d'expérience de CURIUM sur des déchets d'arsenic en général montre que pour traiter l'eau contenant des sels d'arsenic (III), le procédé est d'oxyder l'As (III) en As (V) par chloration pour augmenter son insolubilité. Un autre retour d'expérience montre que le trioxyde d'arsenic n'est pas accepté en Installation de Stockage de déchets dangereux (ISDD) avec stabilisation. En effet, le trioxyde d'arsenic reste toujours mobile même s'il est stabilisé avec des liants hydrauliques.

K-UTEC a également soulevé ce point lors de la tierce expertise du 02/05/2016 (Rapport géochimie).

A la page 42 de son rapport, K-UTEC, concernant l'arsenic, « suppose une prépondérance de trioxyde de diarsenic (As_2O_3), que cette substance est présente souvent à de très fortes concentrations dans les déchets de l'industrie verrière et que le trioxyde de diarsenic est très soluble dans l'eau ».

A la page 50 de son rapport, K-UTEC écrit « qu'en raison de la genèse des déchets stockés, les sociétés K-UTEC et Dr. H. Marx Material Testing and Consulting tablent essentiellement sur la présence de composés d'oxyde d'arsenic, et notamment de trioxyde et de pentoxyde de diarsenic. L'INERIS quant à elle définit l'arséniate de calcium comme composé déterminant au regard de la solubilité. La solubilité indiquée de cette substance étant de 15,4 mg/l, seule une faible mobilisation de l'arsenic serait à craindre selon l'étude de l'INERIS ».

Cependant dans ce même rapport aux pages 50 et 51, K-UTEC apporte les compléments suivants :

« En revanche, la mobilisation de l'arsenic peut être estimée avec plus de facilité. Les oxydes d'arsenic solubles ou les arsénites alcalins solubles éventuellement contenus dans les déchets réagiront avec l'excédent d'ions de calcium présents dans la phase fluide fortement basique, en formant des arsénites et/ou des arséniates de calcium difficilement solubles. En présence d'ions de baryum, on peut également observer la formation d'arsénites et d'arséniates de baryum. En présence d'ions de fer, on assiste à la formation de composés ferreux de l'arsenic. Tous ces composés de type arsénites ou arséniates présentent une faible solubilité dans l'eau et ne pourront donc enrichir la phase fluide présente dans la zone de stockage que dans une faible mesure. La solubilité dans l'eau de l'arséniate de calcium est indiquée avec 130 mg/l dans la base de données des substances dangereuses GESTIS. L'arsénite de calcium de son côté est classé "peu soluble" dans cette même base de données, sans indication chiffrée concrète. Comme l'arsenic ne dispose pas d'une chimie de coordination très marquée et en raison de la multiplicité d'ions et de composés présents dans la phase fluide, aucune solubilité accrue des composés d'arsenic difficilement solubles n'est attendue. »

A la page 48 de ce même rapport K-UTEC souligne l'incertitude qu'il peut y avoir autour du comportement de l'arsenic avec la mention suivante : « Pour l'arsenic disponible sous forme de trioxyde ou de pentoxyde de diarsenic et pour les composés solubles d'arsénite ou d'arséniate en milieu basique et en présence d'ions de calcium, de baryum ou de fer, on peut tabler sur la formation d'arsénites ou d'arséniates de calcium, de baryum et de fer difficilement solubles dans l'eau. En revanche, aucune quantification sûre de ces réactions chimiques n'est possible en l'état actuel des données »

Ainsi, en prenant en compte l'ensemble du contexte géochimique, K-UTEC conclut donc à la faible solubilité de l'arsénite de calcium avec tous les éléments chimiques présents autour de l'élément arsenic.

CURIUM trouve la démonstration pertinente et approfondie, mais ne peut pas plus juger les conclusions faute de données bibliographiques sur la solubilité des molécules dans différents contextes. Seules des modélisations voire des essais pourraient permettre d'aller plus loin sur le sujet.

3 Incertitude liée aux échantillons

Durant la tierce expertise, des analyses par ICP sur échantillons ont été effectuées par le laboratoire Dr. Marx GmbH afin d'affiner les résultats concernant les concentrations en métaux lourds présents dans les déchets (Cf. page 22 du rapport d'étude INERIS du 01/06/2016). De ce fait, le degré d'incertitude estimé à environ 50% avec des analyses par fluorescence X, a été largement diminué par les analyses avec l'ICP.

Ces analyses ont également été effectuées sur les échantillons de la « déchèterie » et les résultats obtenus servent de représentants pour l'ensemble d'un lot (Cf. Paragraphe 2 pages 23 du rapport d'étude INERIS du 01/06/2016). Nous pouvons émettre quelques incertitudes sur la représentativité de l'échantillonnage mais il est difficilement possible de faire mieux en l'état actuel du stockage où l'accessibilité aux déchets est limitée voire impossible.

4 Les modèles utilisés pour la définition du terme source

L'INERIS a utilisé le modèle Minteq 3.0 pour modéliser le terme source. Visual MINTEQ est un modèle d'équilibre chimique pour le calcul de la spéciation des métaux, des équilibres de solubilité, de la sorption, etc... pour les eaux naturelles. A l'origine l'INERIS mentionne que c'est la base de données « Pitzer » qui devait être utilisée mais, « cette base ne comporte malheureusement pas tous les métaux lourds qui nous intéressent ici, en particulier l'arsenic, et n'a donc pas été utilisée » (Cf. page 53 du rapport d'étude INERIS DRC-10-108130-12610B du 03/11/2011 qui sert pour les modèles du rapport d'étude INERIS du 01/06/2016).

La seule limite de ce modèle, sans aborder les données d'entrée, est la présence de complexations supplémentaires qui font apparaître des éléments insolubles. « La présence de certains composés peut influencer notablement les calculs. Ainsi la prise en compte des ions Fe^{3+} fait apparaître des composés insolubles pour le Co » (Cf. page 57 du rapport d'étude INERIS DRC-10-108130-12610B du 03/11/2011). La représentativité des données d'entrée est alors très importante pour éviter les mauvaises interprétations de résultats.

CURIUM n'a pas suffisamment de connaissance et d'expérience sur ce type de modèle pour apporter une critique constructive sur ce point.

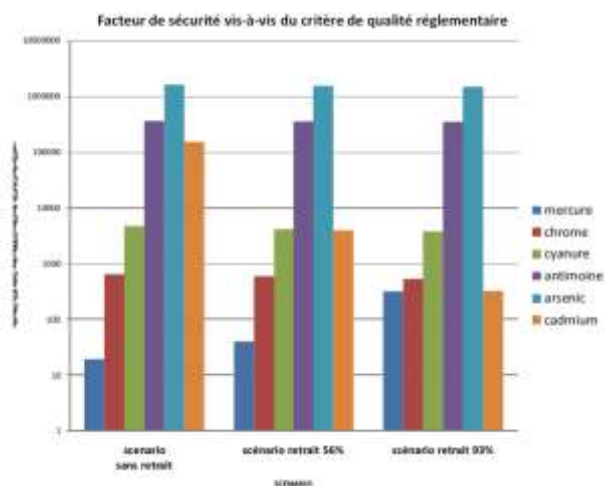
5 Le facteur de sécurité et l'étude d'impact

Afin de déterminer l'impact potentiel du terme source sur la nappe phréatique, l'INERIS a mis en place un système de facteur de sécurité.

Sa définition apparaît en page 23 du rapport d'étude INERIS du 01/06/2016. Il s'agit « du rapport, pour un cas donné, entre la concentration du critère de qualité environnementale (ou du critère de l'environnement local témoin) et la concentration de pic attendue dans la première maille du modèle d'épanchement dans la nappe phréatique d'Alsace ».

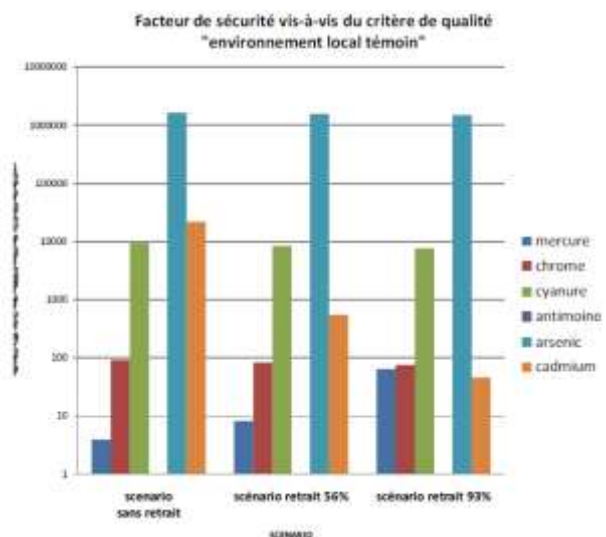
L'INERIS utilise le modèle de MARTHE pour transférer le terme source dans les différentes couches géologiques jusqu'à la surface (impact sur la nappe) et ainsi calculer le facteur de sécurité pour chaque élément (page 39 du rapport d'étude INERIS du 01/06/2016).

Les résultats sont les suivants :



Facteur de sécurité vis-à-vis du critère de qualité réglementaire pour le Scénario retrait 93%	
Élément	Facteur de sécurité
Hg	~ 500
Cd	~ 500
Cr	~ 700
CN	~ 5 000
Sb	~ 500 000
As	~ 1 000 000

Tableau 5 : Facteur de sécurité vis-à-vis du critère de qualité réglementaire pour le Scénario retrait 93%



Facteur de sécurité vis-à-vis du critère de qualité "environnement local témoin" pour le Scénario retrait 93%	
Élément	Facteur de sécurité
Cd	~ 70
Hg	~ 80
Cr	~ 90
CN	~ 10 000
As	~ 1 000 000

Tableau 6 : Facteur de sécurité vis-à-vis du critère de qualité "environnement local témoin" pour le Scénario retrait 93%

Interprétation des résultats : Le cadmium, le mercure et le chrome arrivent en premier. Leurs facteurs de sécurité, compris entre 70 et 90 sont très proches, mais restent néanmoins très élevés. Le cyanure arrive après, avec un facteur de sécurité de 10 fois à 100 fois supérieur aux trois premiers suivant les critères, puis l'antimoine avec un facteur de sécurité 1000 fois supérieur aux trois premiers, et enfin l'arsenic avec un facteur de sécurité de 1000 à 10 000 fois supérieur aux trois premiers.

6 Conclusion

La méthodologie de l'INERIS pour définir le terme source est cohérente et rigoureuse, s'appuyant sur des arguments réglementaires et des modèles de calcul.

Au vu des facteurs de sécurité obtenus, dans le cadre de l'élaboration du scénario S4, les éléments les plus contraignants pour la nappe phréatique seraient, dans l'ordre : le trio mercure / cadmium / chrome, puis le cyanure, l'antimoine et l'arsenic.

Cependant, nous émettons une incertitude sur la hiérarchisation INERIS de l'élément arsenic. Il arrive seulement en 6^{ème} et dernière position avec un facteur de sécurité extrêmement élevé alors que suivant les contextes, il pourrait avoir un impact beaucoup plus important sur le terme source. La chimie de l'arsenic étant complexe et les données bibliographiques assez fragmentaires, il n'est pas possible d'apporter un jugement sur cette position de l'arsenic. Seules des modélisations voire des essais pourraient permettre d'aller plus loin sur le sujet.

III. Elaboration d'une matrice d'interaction entre classes de déchets et d'une classification

Afin de compléter les études antérieures et d'apporter un point de vue différent sur la définition du scénario S4, nous avons raisonné non pas par élément (Hg, Cd, Cr, etc...) mais par classe de déchets présents dans la mine. Il s'agit donc, ici, d'une étude d'interaction entre les classes de déchets stockés dans les blocs. Le but est de vérifier les effets positifs ou négatifs d'une typologie de déchet par rapport à une autre, suite à l'envoyage du stockage par une saumure saturée. La classe D13 – Déchets amiantés n'a pas été prise en compte dans la matrice, car c'est une classe de déchet inerte qui n'aura aucune interaction avec les autres classes ; il en va de même pour les déchets de chantier générés pendant le dernier déstockage.

1 Elaboration de la matrice

La matrice a été réalisée de la façon suivante.

a Etape 1 : Listage de l'ensemble des molécules présentes dans chacune des classes de déchets issus des FID

La FID est un document renseigné par le producteur de déchet, qui permet de caractériser le déchet du point de vue :

- Des procédés à l'origine,
- De sa composition chimique,
- Des risques qu'il comporte,
- Du type de conditionnement

Ce document est une obligation réglementaire pour que l'exutoire du déchet, ici StocaMine, puisse prendre la décision d'autoriser ou non la prise en charge du déchet en fonction des caractéristiques du déchet et des spécifications indiquées dans l'arrêté préfectoral d'exploiter de l'exutoire. Dans le cas d'une acceptation, un Certificat d'Acceptation Préalable (CAP) est établi. Ce CAP est un dossier qui autorise le producteur de déchet à livrer le déchet décrit dans la FID.

A partir de ces FID les molécules composant le déchet ont été listées. Nous avons recensé une vingtaine de molécules différentes par classe de déchets.

b Etape 2 : Simplification du nombre de combinaisons d'interactions possibles

Cette étape se fait par la sélection d'espèces chimiques¹ les plus représentatives de chaque classe de déchets parmi celles listées. En effet, au vu du grand nombre de molécules présentes dans chaque classe (environ une vingtaine par classe de déchets), nous avons sélectionné, en concertation avec ANTEA, au maximum 2 espèces chimiques, les plus représentatives sur le plan quantitatif de chaque classe de déchets. Nous nous sommes appuyés sur les données fournies par la tierce expertise ARTELIA/K-UTEC du 02/05/2016. Cette phase de travail nous a permis de passer à 181 combinaisons sur les 46360 combinaisons de départ.

¹ Espèces chimiques : Regroupement de molécules chimiques ayant des propriétés chimiques similaires

Les espèces chimiques sélectionnées par classe de déchets sont présentées dans le tableau 7 ci-dessous.

L'écriture bleu en italique dans ce tableau représente la partie réactive de l'espèce chimique. Une interligne du tableau représente une espèce chimique.

Classe de déchets	Espèces chimiques retenues	Formules chimiques
A1 Sels de trempes	<i>Cyanure</i> de métaux alcalins	NaCN, KCN
	<i>Nitrite</i> de métaux alcalins & <i>Nitrate</i> de métaux alcalins	NaNO ₂ , KNO ₂ NaNO ₃ , KNO ₃
	Chlorure de <i>baryum</i>	BaCl ₂
A2 Sels de trempes non cyanurés	<i>Nitrite</i> de métaux alcalins & <i>Nitrate</i> de métaux alcalins	NaNO ₂ , KNO ₂ NaNO ₃ , KNO ₃
	<i>Arséniate</i> de métaux alcalins & alcalino-terreux	Na ₃ (AsO ₃), K ₃ (AsO ₃) Mg ₃ (AsO ₃) ₂ , Ca ₃ (AsO ₃) ₂
B3 Déchets arséniés	<i>Trioxyde d'arsenic</i>	As ₂ O ₃
	Chlorure de <i>mercure</i>	Hg ₂ Cl ₂ , HgCl ₂
B5 Déchets mercuriels	Sulfate de <i>mercure</i>	Hg ₂ SO ₄ , HgSO ₄
	<i>Arséniate</i> de métaux (tous types)	M _x (AsO ₃) _y avec M représentant des sels métalliques (ex : Fe ³⁺ , Hg ²⁺ , Pb ²⁺ , Na ⁺ , Ca ²⁺ ,...)
B10 Produits phytosanitaires	<i>Trioxyde d'arsenic</i>	As ₂ O ₃
	<i>Oxyde de chrome III</i>	Cr ₂ O ₃
C4 Déchets chromiques	<i>Chromate</i> & <i>Bichromate</i> (Tous types)	M _x (CrO ₄) _y M _x (Cr ₂ O ₇) _y avec M représentant des sels métalliques (ex : Fe ³⁺ , Hg ²⁺ , Pb ²⁺ , Na ⁺ , Ca ²⁺ ,...)
	<i>Cyanure</i> de métaux alcalins	NaCN, KCN
C8 Déchets de galvanisation	<i>Chromate</i> & <i>Bichromate</i> (Tous types)	M _x (CrO ₄) _y M _x (Cr ₂ O ₇) _y avec M représentant des sels métalliques (ex : Fe ³⁺ , Hg ²⁺ , Pb ²⁺ , Na ⁺ , Ca ²⁺ ,...)
	<i>Béryllium</i>	Be
D7 Résidus de l'industrie	<i>Oxyde de béryllium</i>	BeO
	Sels de <i>plomb</i>	PbCl ₂ , PbSO ₄ , Pb(OH) ₂ ,...
D12 Déchets de laboratoire	Sels d' <i>arsenic</i>	M _x (AsO ₃) _y M _x (AsO ₂) _y avec M représentant des sels métalliques (ex : Fe ³⁺ , Hg ²⁺ , Pb ²⁺ , Na ⁺ , Ca ²⁺ ,...)
	<i>Chaux</i>	Ca(OH) ₂
E9 Résidus d'incinération	<i>Bicarbonate</i> de sodium	NaHCO ₃
	<i>Métaux lourds</i>	Cations métalliques solubles de : As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Ni, Pb, Sb, Se, Sn, Tl, V et Zn

Tableau 7 : Espèces chimiques sélectionnées par classe de déchets

c **Etape 3 : Détermination des interactions entre chaque couple d'espèces chimiques**

La recherche des interactions est basée sur l'expérience professionnelle de CURIUM, mais également sur de la recherche bibliographique.

CURIUM a étudié

- Les différentes réactions chimiques entre les espèces chimiques,
- Les changements de solubilité des espèces chimiques
- Les réactions d'oxydo-réduction entre les espèces chimiques
- Les dégagements gazeux
- Les réarrangements ioniques

Ces interactions sont codifiées de la façon suivante :

- +1 : effet positif
- 0 : effet neutre
- -1 : effet négatif

D'une façon générale, une interaction est dite positive si elle précipite le polluant, le rendant moins mobile, et une interaction est dite négative si le polluant devient plus soluble et donc plus mobile dans la phase aqueuse.

L'ensemble des interactions entre chaque espèce chimique est développé dans l'annexe I.

Le résultat est une matrice des interactions entre classes de déchets, présentée à la page suivante.

	A1 - Sels de Trempe		A2 - Sels de trempe non cyanurés		B3 - Déchets arséniés		B5 - Déchets mercuriels		B10 - Produits phytosanitaires		C4 - Déchets chromiques		C8 - Déchets de galvanisation		D7 - Résidus de l'industrie		D12 - Déchets de laboratoire		E9 - Résidu d'incinération		B6 - Terre polluée	
	Cyanure de métaux alcalins	Nitrite/nitrate de métaux alcalins	Chlorure de baryum	Nitrite/nitrate de métaux alcalins	Arséniate de métaux alcalins & alcalino-terreux	Trioxyde d'arsenic	chlorure de mercure	sulfate de mercure	arséniate de métaux (tous types)	trioxyde d'arsenic	Oxyde de chrome III	Chromate et bichromate (tous types)	Cyanure de métaux alcalins	Chromate et bichromate (tous types)	Beryllium	Oxyde de béryllium	Sel de plomb	Sel d'arsenic	Chaux	Bicarbonate de sodium	Métaux lourds	
A1 - Sels de Trempe	Cyanure de métaux alcalins		0	0	0	0	+1	0	0	0	0	+1	0	+1	0	0	+1	0	0	0	0	+1
	Nitrite/nitrate de métaux alcalins		0	0	-1	0	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	-1	0	-1	-1	+1	0	0	0
A2 - Sels de trempe non cyanurés	Chlorure de baryum	0	0		+1	0	0	+1	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	+1	+1	+1	0	
	Nitrite/nitrate de métaux alcalins	0	0		-1	0	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	-1	0	-1	-1	+1	0	0	
B3 - Déchets arséniés	Arséniate de métaux alcalins & alcalino-terreux	0	-1	+1	-1		+1	+1	0	0	0	0	0	+1	0	+1	0	+1	-1	0	0	
	Trioxyde d'arsenic	0	0	0	0		0	0	0	0	0	-1	0	-1	+1	0	+1	0	+1	0	0	
B5 - Déchets mercuriels	chlorure de mercure	+1	-1	0	-1	+1	0		+1	0	0	-1	+1	-1	0	0	0	+1	+1	+1	0	
	sulfate de mercure	0	-1	+1	-1	+1	0		+1	0	0	0	0	0	0	0	+1	+1	+1	+1	0	
B10 - Produits phytosanitaires	arséniate de métaux (tous types)	0	-1	+1	-1	0	0	+1	+1		0	0	0	+1	0	+1	0	+1	-1	0	0	
	trioxyde d'arsenic	0	0	0	0	0	0	0	0		0	-1	0	-1	+1	0	+1	0	+1	0	0	
C4 - Déchets chromiques	Oxyde de chrome III	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Chromate et bichromate (tous types)	+1	0	0	0	0	-1	-1	0	0	-1		+1	0	+1	0	+1	-1	0	0	0	
C8 - Déchets de galvanisation	Cyanure de métaux alcalins	0	0	0	0	0	0	+1	0	0	0	+1		0	0	+1	0	0	0	0	+1	
	Chromate et bichromate (tous types)	+1	0	0	0	0	-1	-1	0	0	-1	0	0		+1	0	+1	-1	0	0	0	
D7 - Résidus de l'industrie	Beryllium	0	-1	0	-1	+1	+1	0	0	+1	+1	0	+1	0	+1		0	+1	+1	+1	0	
	Oxyde de béryllium	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	
D12 - Déchets de laboratoire	Sel de plomb	+1	-1	0	-1	+1	+1	0	+1	+1	+1	0	+1	+1	0	0		0	+1	0	0	
	sel d'arsenic	0	-1	+1	-1	0	0	+1	+1	0	0	-1	0	-1	+1	0		0	+1	-1	0	
E9 - Résidus d'incinération	Chaux	0	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	0	0	0	0	+1	0	0	+1			+1	
	Bicarbonate de sodium	0	0	+1	0	-1	0	+1	+1	-1	0	0	0	0	+1	0	+1	-1			+1	
B6 - Terre polluée	Métaux lourds	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+1	0	0	0	0	0	+1	+1		

Tableau 8: Matrice des effets d'interactions entre les classes de déchets avec les composés choisis

Matrice simplifiée

Pour une meilleure lecture et interprétation de la matrice présentée dans le tableau 8, page précédente, une matrice simplifiée a été établie en sommant les cotations des interactions par couple de classes de déchets. Le résultat de cette somme est ramené à la codification standard de la matrice à savoir -1 pour un impact négatif, 0 pour un impact neutre et +1 pour un impact positif.

	A1 - Sels de Trempe	A2 - Sels de trempe non cyanurés	B3 - Déchets arséniés	B5 - Déchets mercuriels	B10 - Produits phytosanitaires	C4 - Déchets chromiques	C8 - Déchets de galvanisation	D7 - Résidus de l'industrie	D12 - Déchets de laboratoire	E9 - Résidu d'incinération	B6 - Terre polluée
A1 - Sels de Trempe		0	-1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1
A2 - Sels de trempe non cyanurés	0		0	-1	0	0	0	-1	-1	+1	0
B3 - Déchets arséniés	-1	0		+1	0	-1	-1	+1	+1	+1	0
B5 - Déchets mercuriels	-1	-1	+1		+1	-1	0	0	+1	+1	0
B10 - Produits phytosanitaires	-1	0	0	+1		-1	-1	+1	+1	+1	0
C4 - Déchets chromiques	+1	0	-1	-1	-1		+1	+1	0	0	0
C8 - Déchets de galvanisation	+1	0	-1	0	-1	+1		+1	+1	0	+1
D7 - Résidus de l'industrie	-1	-1	+1	0	+1	+1	+1		+1	+1	0
D12 - Déchets de laboratoire	-1	-1	+1	+1	+1	0	+1	+1		+1	0
E9 - Résidu d'incinération	+1	+1	+1	+1	+1	0	0	+1	+1		+1
B6 - Terre polluée	+1	0	0	0	0	0	+1	0	0	+1	

Tableau 9 : matrice simplifiée

2 Classification en fonction des interprétations des résultats de la matrice

La matrice permet de mettre en évidence les influences positives et négatives des classes de déchets les unes par rapport aux autres. Cela nous a permis de proposer une hiérarchisation des classes de déchets basée sur leur impact positif ou négatif entre elles.

Il est possible d'avoir des approches différentes, suivant que l'on privilégie l'aspect positif ou négatif d'une classe de déchets. Les tableaux ci-dessous présentent différentes façons d'appréhender le classement.

NB : il est possible d'obtenir des égalités dans les différents classements proposés, ce qui va décaler la numérotation du classement des classes de déchets. Cette méthode de classement permet d'effectuer une moyenne finale plus juste.

Il est également important de rappeler que ce classement se réalise stricto sensu en prenant en compte uniquement les interactions entre typologies de déchets.

a Hierarchisation 1 : Somme des impacts

Elle détermine la tendance totale des interactions. Une valeur basse indique une interaction négative sur l'ensemble du stockage et inversement.

Le tableau ci-dessous présente le résultat de cette hiérarchisation avec en 1^{er} la classe de déchets ayant le potentiel d'interaction le plus négatif avec les autres classes et en 10^{ème} position la classe de déchets ayant le potentiel d'interaction le plus positif avec les autres classes. Il en résulte une tendance ou hiérarchisation des classes de déchets.

Hiérarchisation n°1 : Somme des impacts positifs et négatifs pour chaque classe de déchets								
Class. CURIUM	Classe de déchets	Note finale	Notes des effets positifs		Notes des effets neutres		Notes des effets négatifs	
			Nb de +1	Pondéré	Nb de 0	Pondéré	Nb de -1	Pondéré
				1		0		1
1	A2 – Sels de trempe non cyanurés	-2	1	1	6	0	3	3
2	A1 - Sels de Trempe	-1	4	4	1	0	5	5
3	C4 - Déchets chromiques	0	3	3	4	0	3	3
4	B3 – Déchets arséniés	1	4	4	3	0	3	3
4	B10 - Produits phytosanitaires	1	4	4	3	0	3	3
4	B5 - Déchets mercuriels	1	4	4	3	0	3	3
7	C8 - Déchets de galvanisation	3	5	5	3	0	2	2
8	D12 - Déchets de laboratoire	4	6	6	2	0	2	2
8	D7 - Résidus de l'industrie	4	6	6	2	0	2	2
10	E9 - Résidus d'incinération	7	7	7	3	0	0	0
11	B6 - Terre polluée	8	8	8	2	0	0	0

Tableau 10: hiérarchisation par somme des impacts positifs et négatifs

b Hierarchisation 2 : Somme des impacts positifs

Ici, l'approche s'appuie sur l'importance des effets positifs de la classe de déchets sur le stockage. Plus la note finale de la classe de déchets est élevée, plus l'impact est positif sur le stockage.

Hiérarchisation n°2 : Somme des impacts positifs pour chaque classe de déchets								
Class. CURIUM	Classe de déchets	Note finale	Notes des effets positifs		Notes des effets neutres		Notes des effets négatifs	
			Nb de +1	Pondéré	Nb de 0	Pondéré	Nb de -1	Pondéré
				1		0		0
1	A2 – Sels de trempe non cyanurés	1	1	1	6	0	3	0
2	C4 - Déchets chromiques	3	3	3	4	0	3	0
2	B6 - Terre polluée	3	3	3	7	0	0	0
4	B3 – Déchets arséniés	4	4	4	3	0	3	0
4	B10 - Produits phytosanitaires	4	4	4	3	0	3	0
4	B5 - Déchets mercuriels	4	4	4	3	0	3	0
4	A1 - Sels de Trempe	4	4	4	1	0	5	0
8	C8 - Déchets de galvanisation	5	5	5	3	0	2	0
9	D7 - Résidus de l'industrie	6	6	6	2	0	2	0
9	D12 - Déchets de laboratoire	6	6	6	2	0	2	0
11	E9 - Résidus d'incinération	8	8	8	2	0	0	0

Tableau 11: hiérarchisation par somme des impacts positifs

c Hiérarchisation 3 : Somme des impacts négatifs

Dans ce classement, les effets négatifs des classes de déchets sont déterminants : plus la note finale est basse, plus la classe de déchets aura un impact défavorable.

Hiérarchisation n°3 : Somme des impacts négatifs pour chaque classe de déchets								
Class. CURIMUM	Classe de déchets	Note finale	Notes des effets positifs		Notes des effets neutres		Notes des effets négatifs	
			Nb de +1	Pondéré	Nb de 0	Pondéré	Nb de -1	Pondéré
				0		0		1
1	A1 - Sels de Trempe	-5	4	0	1	0	5	5
2	C4 - Déchets chromiques	-3	3	0	4	0	3	3
2	B10 - Produits phytosanitaires	-3	4	0	3	0	3	3
2	B5 - Déchets mercuriels	-3	4	0	3	0	3	3
2	B3 – Déchets arséniés	-3	4	0	3	0	3	3
2	A2 – Sels de trempe non cyanurés	-3	1	0	6	0	3	3
7	C8 - Déchets de galvanisation	-2	5	0	3	0	2	2
7	D12 - Déchets de laboratoire	-2	6	0	2	0	2	2
7	D7 - Résidus de l'industrie	-2	6	0	2	0	2	2
10	B6 - Terre polluée	0	3	0	7	0	0	0
11	E9 - Résidus d'incinération	0	8	0	2	0	0	0

Tableau 12: hiérarchisation par somme des impacts négatifs

d Hiérarchisation 4 : Somme des impacts avec pondération

Il est possible d'ajouter des coefficients de pondération afin d'accorder plus de poids à certains effets. Ci-dessous, nous avons une pondération de 2 pour les effets négatifs, de 1 pour les effets positifs et de 0 pour les effets neutres. Comme pour les autres classements, plus la note finale est basse, et plus la classe de déchets aura un impact défavorable.

Hiérarchisation n°4 : Somme des impacts avec pondération pour chaque classe de déchets								
Class. CURIMUM	Classe de déchets	Note finale	Notes des effets positifs		Notes des effets neutres		Notes des effets négatifs	
			Nb de +1	Pondéré	Nb de 0	Pondéré	Nb de -1	Pondéré
				1		0		2
1	A1 - Sels de Trempe	-6	4	4	1	0	5	10
2	A2 – Sels de trempe non cyanurés	-5	1	1	6	0	3	6
3	C4 - Déchets chromiques	-3	3	3	4	0	3	6
4	B10 - Produits phytosanitaires	-2	4	4	3	0	3	6
4	B5 - Déchets mercuriels	-2	4	4	3	0	3	6
4	B3 – Déchets arséniés	-2	4	4	3	0	3	6
7	C8 - Déchets de galvanisation	1	5	5	3	0	2	4
8	D12 - Déchets de laboratoire	2	6	6	2	0	2	4
8	D7 - Résidus de l'industrie	2	6	6	2	0	2	4
10	B6 - Terre polluée	3	3	3	7	0	0	0
11	E9 - Résidus d'incinération	8	8	8	2	0	0	0

Tableau 13: hiérarchisation par somme des impacts avec pondération

e Tendance de hiérarchisation

En observant les différents classements, il est possible d'établir un classement moyen qui prend en compte le classement de chacun des points de vue abordés. Ce tableau est présenté ci-dessous :

Classement final CURIMUM	Classe de déchets	Classement moyen de chaque classe
1	A2 – Sels de trempe non cyanurés	1,50
2	A1 – Sels de trempe	2,00
3	C4 – Déchets chromiques	2,50
4	B3 – Déchets arséniés	3,50
4	B10 – Produits phytosanitaires	3,50
4	B5 – Déchets mercuriels	3,50
7	C8 – Déchets de galvanisation	7,25
8	D12 – Déchets de laboratoire	8,00
8	D7 – Résidus de l'industrie	8,00
10	B6 – Terre polluée	8,25
11	E9 – Résidus d'incinération	10,75

Tableau 14: moyenne et classement des classes de déchets impactant négativement le stockage

De manière générale, nous retrouvons les « Résidus d'incinération » comme ayant des impacts favorables sur l'ensemble du stockage contrairement aux classes A2 – Sels de trempe non cyanurés, A1 – Sels de trempe, C4 – Déchets chromiques, B3 – Déchets arséniés, B10 – Produits phytosanitaires et B5 – Déchets mercuriels qui ont des effets négatifs sur le stockage.

3 Remarques spécifiques sur les classes A1 – Sels de trempe et A2 – Sels de trempe non cyanurés

a Impact du cyanure présent dans la classe de déchets A1 – Sels de trempe

Les sels de trempe de la classe de déchets A1 sont composés de cyanures à hauteur de 0,2%. D'après l'INERIS, le cyanure peut impacter la solubilité du mercure et du cadmium. Nous avons évalué dans ce paragraphe, l'impact du cyanure sur ces deux éléments.

Pour rappel, le rapport d'étude de l'INERIS n°INERIS-DRC-121008130-00744B du 19/04/2012 indique page 14 :

*« Par rapport à l'approche adoptée précédemment par BMG², considérant que la totalité des contaminants stockés serait dissoute dans la saumure transitant par le stockage au cours de l'envoyage, il s'avère que la prise en compte des effets de précipitation entraîne une diminution notable des concentrations attendues en certains ions métalliques comme le baryum (Ba), le bismuth (Bi), le cobalt (Co), le plomb (Pb) et le nickel (Ni). **Cependant, en raison des effets de complexation par les***

² 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

chlorures ou par les cyanures, d'autres ions ne seront que très peu concernés par cette diminution, voire pas du tout : c'est le cas du mercure (Hg), du cadmium (Cd) et, dans une moindre mesure, de l'antimoine (Sb), dont les niveaux de concentration dans le terme source restent élevés. »

En effet le mercure et le cadmium peuvent se complexer avec les chlorures et les cyanures. Les chlorures sont présents essentiellement dans la saumure qui va lixivier les déchets. Il n'est donc pas possible de retirer ces chlorures pour limiter la solubilité du cadmium et mercure.

Par contre les cyanures, le cadmium et le mercure sont présents uniquement dans les déchets. Il est donc possible de retirer ces cyanures pour limiter potentiellement la solubilité du cadmium et du mercure ou de retirer l'un ou l'autre métal.

A titre d'information, les complexes du cyanure avec le mercure et le cadmium ont pour formules chimiques respectives $[Hg(CN)_4]^{2-}$ et $[Cd(CN)_4]^{2-}$. Dans les deux cas, une mole³ de mercure (Hg) ou de cadmium (Cd) « consomme » 4 moles de cyanure. Le mercure a plus d'affinité avec le cyanure que le cadmium. En effet le mercure sera prioritairement impacté par la solubilisation par complexation avec le cyanure.

Le tableau ci-dessous montre l'impact dans le cas de l'hypothèse du retrait du mercure vis-à-vis du cadmium.

	Cyanure	Mercure	Cadmium	Complexe cyanure de mercure (en équivalent mercure)	Complexe cyanure de cadmium (en équivalent cadmium)
Masse actuelle T	4,37	1,29	32,65		
Cas ennoyage sans retrait des trois éléments	0	0	28,65	1,29	4,00
Cas ennoyage avec retrait du mercure	0	0	27,93	0	4,72

Tableau 15 : Impact sur le cadmium dans le cas du retrait total du mercure

Interprétation des résultats :

Dans le cas d'un scénario de retrait du mercure, ce retrait augmentera de 2,3 points la solubilisation du cadmium par complexation avec le cyanure par rapport à la masse totale de cadmium. Sans retrait du mercure la solubilisation du cadmium représente 12,2 % de la masse totale et avec le retrait du mercure 14,5 %.

Dans le cas d'un scénario de retrait du cyanure, il n'a pas pu être évalué l'impact de ce retrait, à savoir le gain en termes d'insolubilité, sur le mercure et le cadmium par manque d'élément sur l'équilibre chimique de formation des complexes du cyanure (à ne pas confondre avec les réactions d'arrangement ionique avec les cyanures – $Cd^{2+} + 2CN^- \rightarrow Cd(CN)_2$). Seuls des essais pourraient permettre d'aller plus loin sur le sujet.

b Impact des nitrites et nitrates de la classe de déchets A1 – Sels de trempes et A2 – Sels de trempes non cyanurés

Les sels de trempes de la classe de déchets A1 et A2 contiennent des nitrates et nitrites de sels alcalins. Ce sont ces sels de nitrites/nitrates qui placent les sels de trempes A1 et A2 en tête de la hiérarchisation des effets négatifs sur le stockage.

³ Mole : unité définissant une quantité d'élément chimique (atomes, ions, molécules).

Le rapport de la tierce expertise ARTELIA / K-UTEC du 02/05/2016 « Note relative à la réévaluation des quantités en contaminants » indique que cette source de nitrites/nitrates augmente la solubilisation des métaux lourds.

« Le programme d'analyses proposé par ARTELIA / K-UTEC a également pris en compte certains paramètres chimiques supplémentaires, non qualifiables de substances dangereuses, mais qui sont susceptibles **d'avoir un impact déterminant sur la minéralisation de la saumure, et sur la formation de complexes de métaux lourds solubles**. Les paramètres concernés sont notamment **les nitrites, les nitrates** et l'ammonium/ammoniac. ».

L'impact de ces nitrites/nitrates sur les métaux lourds stockés dans la mine est étudié dans le tableau 16. Il est considéré que 100% des nitrites/nitrates réagiront exclusivement sur les métaux lourds pour les solubiliser. Cette hypothèse est majorante.

	Nitrate	Nitrite	Somme Nitrate/Nitrite	Métaux lourds
Masse actuelle non dissoute en tonne	80,49	43,16	123,65	889,72
Masse actuelle non dissoute en tonne après ennoyage	0	0	0	794,85

Tableau 16 : Impact des nitrites/nitrates sur les métaux lourds

L'impact négatif des nitrites/nitrates sur les métaux lourds est au plus de 10%. Ce taux est majorant car il ne prend pas en compte les effets de solubilisation du nitrite/nitrate dans la saumure, ni les interactions avec les métaux autres que les métaux lourds comme le fer par exemple.

4 Limites / Incertitudes des résultats de hiérarchisation CURIUM

La matrice élaborée possède quelques limites notamment :

- La sélection des molécules par les FID qui sont déclaratives, et peuvent donc être erronées lors de la rédaction de la déclaration.
- La réduction du nombre de combinaisons de 46360 à 181. Cela se traduit par la sélection de 2 espèces chimiques représentatives sur plus d'une vingtaine de molécules par classe de déchets.
- La simplification des effets par classe par leur somme, sans tenir compte des paramètres comme la proportion des molécules dans chaque classe ou une pondération des effets entre eux sur une échelle de dangerosité.
- Pour finir, la grille de hiérarchisation ne tient compte ni des quantités des classes de déchets dans la mine, ni de la probabilité de rencontre des classes entre elles. Un des points de vue pourrait donc être plus juste que les autres.

5 Conclusion

Curium a mis en place une matrice d'interaction entre les classes de déchets enfouis dans la mine. Cette matrice est un outil d'aide à la décision de hiérarchisation d'une classe de déchets pouvant impacter de façon positive ou négative les autres classes de déchets. Elle a été obtenue à la suite de plusieurs simplifications comme la sélection des espèces chimiques des différentes classes de déchets, la non-prise en compte des quantités des classes de déchets ni de la probabilité d'occurrence des interactions.

Le résultat donne une tendance de hiérarchisation du potentiel d'influence des classes de déchets. Même s'il est possible d'avoir des résultats différents selon la pondération choisie dans la grille de hiérarchisation, une tendance se dégage, avec un groupe de classes de déchets qui arrive systématiquement en tête des classes les plus négatives sur le stockage. Il s'agit des classes A2 – Sels de trempe non cyanurés, A1 – Sels de trempe, C4 – Déchets chromiques, B3 – Déchets arséniés, B10 – Produits phytosanitaires et B5 – Déchets mercuriels.

Pour la classe de déchets A2 – Sels de trempe, l'impact est lié en partie à la présence de cyanure. L'INERIS a mis en avant le fait que la présence concomitante de mercure, cadmium et cyanure pouvait induire une solubilité plus élevée du mercure et du cadmium ; L'hypothèse d'un scénario de retrait du mercure pouvant également accentuer la mobilité du cadmium par la « libération » d'une quantité disponible de cyanure et leur complexation avec le cadmium. En l'absence de données bibliographiques complètes sur la complexation, il n'a pas été possible d'évaluer la quantité produite de complexe cyanuré de cadmium et de mercure. Quoi qu'il en soit, par la prise en compte des quantités relatives de ces 3 espèces chimiques, et en estimant que la totalité des cyanures allait former des complexes solubles de cadmium et de mercure, le retrait du mercure allait entraîner une augmentation de la solubilité possible du cadmium de 12,2% à 14,5%.

Les deux classes de sels de trempe contiennent également des nitrites et nitrates pouvant produire une augmentation de la solubilité de l'ensemble des métaux lourds et métaux de transition présents dans la mine. En comparant les quantités de métaux contenues dans les classes de déchets, avec les nitrites-nitrates et en appliquant les hypothèses majorantes, l'augmentation potentielle de la fraction solubilisée de ces métaux est de l'ordre de 10% au maximum. Les nitrites-nitrates réagiront vraisemblablement indistinctement sur le fer (non quantifié mais présent dans les déchets), le zinc, le plomb, ou encore le mercure et le cadmium.

IV. Conclusion générale

La définition du scénario S4, à savoir la hiérarchisation des déchets pertinents pour limiter l'impact sur l'environnement en vue d'une proposition de déstockage partiel, a été étudiée selon l'approche de l'INERIS avec son terme source dans un premier temps, et selon l'approche de CURIUM avec la matrice des interactions entre classes de déchets postérieures à l'ennoyage de la mine dans un second temps.

La méthodologie de l'INERIS pour définir le terme source est cohérente et rigoureuse, s'appuyant sur des arguments réglementaires et des modèles de calculs. Les éléments les plus majorants du terme source sont dans l'ordre : le chrome, le cadmium, le cyanure, le mercure, etc...

Au vu des facteurs de sécurité obtenus et dans le cadre de l'élaboration du scénario S4, les éléments les plus contraignants pour la nappe phréatique seraient, dans l'ordre : le trio mercure / cadmium / chrome, le cyanure, l'antimoine, et l'arsenic.

Cependant, nous émettons une incertitude sur la hiérarchisation INERIS de l'élément arsenic. Il arrive seulement en 6^{ème} position avec un facteur de sécurité extrêmement élevé, alors que suivant les contextes, il pourrait avoir un impact beaucoup plus important sur le terme source. La chimie de l'arsenic étant complexe et les données bibliographiques assez fragmentaires, il n'est pas possible d'apporter un jugement sur cette position. Seules des modélisations voire des essais pourraient permettre d'aller plus loin sur le sujet.

CURIUM a adopté une approche différente pour proposer une hiérarchisation des déchets pertinents afin de limiter leur impact sur l'environnement. Elle s'appuie sur les interactions positives ou négatives entre les classes de déchets pouvant agir sur l'environnement.

CURIUM a mis en place une matrice d'interaction entre les classes de déchets. Même s'il est possible d'avoir des résultats différents selon la pondération choisie dans la grille de hiérarchisation, une tendance se dégage, avec un groupe de classe de déchets qui arrive systématiquement en tête des classes les plus négatives sur le stockage. Il s'agit des classes A2 – Sels de trempe non cyanurés, A1 – Sels de trempe, C4 – Déchets chromiques, B3 – Déchets arséniés, B10 – Produits phytosanitaires et B5 – Déchets mercuriels.

Pour la classe de déchets A2 – Sels de trempe, l'impact est lié en partie à la présence de cyanure. L'INERIS a mis en avant le fait que la présence concomitante de mercure, cadmium et cyanure pouvait induire une solubilité plus élevée du mercure et du cadmium ; L'hypothèse d'un scénario de retrait du mercure pouvant également accentuer la mobilité du cadmium par la « libération » d'une quantité disponible de cyanure et leur complexation avec le cadmium. En l'absence de données bibliographiques complètes sur la complexation, il n'a pas été possible d'évaluer la quantité produite de complexe cyanuré de cadmium et de mercure. Quoi qu'il en soit, par la prise en compte des quantités relatives de ces 3 espèces chimiques, et en estimant que la totalité des cyanures allait former des complexes solubles de cadmium et de mercure, le retrait du mercure allait entraîner une augmentation de la solubilité possible du cadmium de 12,2% à 14,5%.

Les deux classes de sels de trempe contiennent également des nitrites et nitrates pouvant produire une augmentation de la solubilité de l'ensemble des métaux lourds et métaux de transition présents dans la mine. En comparant les quantités de métaux contenues dans les classes de déchets, avec les nitrites-nitrates et en appliquant les hypothèses majorantes, l'augmentation potentielle de la fraction solubilisée de ces métaux est de l'ordre de 10% au maximum. Les nitrites-nitrates réagiront vraisemblablement indistinctement sur le fer (non quantifié mais présent dans les déchets), le zinc, le plomb, ou encore le mercure et le cadmium.

La hiérarchisation des espèces chimiques proposée par l'INERIS et la hiérarchisation des classes de déchets de CURIUM ne sont pas comparables car les deux méthodologies sont très différentes. Par contre elles se complètent et sont une aide à la définition du scénario de déstockage S4. Le cas du cadmium en est un exemple.

Le cadmium est pris en compte dans l'étude INERIS et arrive en 2ème position des polluants les plus contraignants du terme source, ce qui est tout à fait logique car les sels de cadmium sont très solubles.

Par contre le cadmium ne fait pas partie d'une classe de déchets identifiée. Il est présent dans les classes de déchets B6-Terres polluées et B3-Déchets arséniés. Le cadmium étant minoritaire par rapport à l'arsenic (III) et (V) dans la classe de déchet B3, il n'a pas été pris en compte dans cette classe par la matrice d'interaction CURIUM. Par contre, dans la classe B6-Terres polluées, le cadmium a été comptabilisé au travers de la grande famille des métaux lourds.

Ces 2 hiérarchisations, celle de l'INERIS et celle de CURIUM, sont donc complémentaires et sont une aide à la définition du scénario de déstockage S4, à savoir définir les déchets pertinents pour limiter l'impact sur l'environnement.

V. Annexe

Annexe I : Interactions entre les espèces chimiques.

Annexe I

Interactions entre les molécules chimiques.

Table des matières

1	Interaction avec le chlorure de baryum	4
a	Chlorure de baryum/Cyanure de métaux alcalins	4
b	Chlorure de baryum/Nitrite-Nitrate de métaux alcalins.....	4
2	Interaction nitrite-nitrate de métaux alcalins/Cyanure de métaux alcalins	5
3	Interaction Arséniate de métaux alcalins et alcalino-terreux.....	5
a	Arséniate/Cyanure de métaux alcalins	5
b	Arséniate/Nitrite-Nitrate métaux alcalins.....	6
c	Arséniate/Chlorure de baryum	6
d	Arséniate/Trioxyde d'arsenic	6
e	Arséniate/Chlorure de mercure	7
f	Arséniate/Sulfate de mercure.....	7
4	Interaction avec le trioxyde d'arsenic	8
a	Trioxyde d'arsenic/Cyanure de métaux alcalins	8
b	Trioxyde d'arsenic/Nitrite-Nitrate de métaux alcalins.....	8
c	Trioxyde d'arsenic/Chlorure de Baryum	9
d	Trioxyde d'arsenic/Chlorure de mercure	9
e	Trioxyde d'arsenic/Sulfate de mercure.....	9
5	Interaction Oxyde de chrome (III)/autres éléments.....	10
6	Interaction Chromate et bichromate de métaux alcalin	10
a	Chromate & bichromate/cyanure de métaux alcalins	10
b	Chromate & bichromate/Nitrite-Nitrate de métaux alcalins.....	11
c	Chromate & bichromate/Chlorure de baryum	11
d	Chromate & bichromate/Arséniate.....	11
e	Chromate & bichromate/Trioxyde d'arsenic	11
f	Chromate & bichromate/chlorure et sulfate de mercure	12
7	Interaction avec le Chlorure de mercure	12
a	Chlorure de mercure/Cyanure de métaux alcalins	12
b	Chlorure de mercure/Nitrite-Nitrate de métaux alcalins	13
c	Chlorure de mercure/Chlorure de baryum	13

8	Interaction Sulfate de mercure	13
a	Sulfate de mercure/Cyanures de métaux alcalins	13
b	Sulfate de mercure/nitrites-nitrates de métaux alcalins	14
c	Sulfate de mercure/Chlorure de baryum	14
9	Interaction avec le béryllium	15
a	Béryllium/Cyanure de métaux alcalins.....	15
b	Béryllium/Nitrites-Nitrates de métaux alcalins.....	15
c	Béryllium/Chlorure de baryum	15
d	Béryllium/Arséniate	16
e	Béryllium/Trioxyle d'arsenic	16
f	Béryllium/Chlorure de mercure	16
g	Béryllium/Sulfate de mercure	17
h	Béryllium/Chromate et dichromate	17
10	Interaction avec l'oxyde de béryllium et les autres éléments	17
11	Interaction avec les sels de plomb	18
a	Sels de plomb/cyanures de métaux alcalins	18
b	Sels de plomb/Nitrite-nitrate de métaux alcalins	18
c	Sels de plomb/Chlorure de baryum	18
d	Sels de plomb/Arséniate	19
e	Sels de plomb/Trioxyle d'arsenic	19
f	Sels de plomb/Chlorure de mercure	19
g	Sels de plomb/Sulfate de mercure.....	20
h	Sels de plomb/Chromate & bichromate	20
i	Sels de plomb/Béryllium	20
12	Interaction avec les sels d'arsenic	21
13	Interaction avec la chaux.....	21
a	Chaux/Cyanures de métaux alcalins	21
b	Chaux/Nitrite-Nitrate de métaux alcalins	21
c	Chaux/Chlorure de baryum	21
d	Chaux/Arséniates métalliques	22
e	Chaux/Trioxyle d'arsenic.....	22
f	Chaux/Chlorure de mercure.....	22
g	Chaux/sulfate de mercure.....	23
h	Chaux/Chromate et dichromate	23
i	Chaux/Béryllium.....	23
j	Chaux/Sels de plomb.....	24

k	Chaux/Sels d’arsenic	24
l	Chaux/Métaux lourds.....	24
14	Interaction avec le bicarbonate de sodium.....	24
a	Bicarbonate de sodium/cyanures de métaux alcalins	25
b	Bicarbonate de sodium/nitrites - nitrates de métaux alcalins.....	25
c	Bicarbonate de sodium/chlorure de baryum.....	25
d	Bicarbonate de sodium/arséniates	26
e	Bicarbonate de sodium/trioxyde d’arsenic.....	26
f	Bicarbonate de sodium/chlorures de mercure	27
g	Bicarbonate de sodium/sulfates de mercure.....	27
h	Bicarbonate de sodium/Chromate – Bichromate.....	28
i	Bicarbonate de sodium/Béryllium	28
j	Bicarbonate de sodium/Sel de plomb.....	28
k	Bicarbonate de sodium/sel d’arsenic.....	29
l	Bicarbonate de sodium/métaux lourds	29
15	Interaction avec les métaux lourds	29
a	Métaux lourds/cyanures de métaux alcalins	30
b	Métaux lourds/Nitrites-nitrates de métaux alcalins	30
c	Métaux lourds/Chlorure de Baryum	31
d	Métaux lourds/Arséniates métalliques.....	31
e	Métaux lourds/trioxyde d’arsenic.....	31
f	Métaux lourds/Chlorure de mercure	31
g	Métaux lourds/Sulfate de mercure.....	32
h	Métaux lourds/Chromates et bichromates.....	32
i	Métaux lourds/Béryllium	32
j	Métaux lourds/Sel de plomb.....	32
k	Métaux lourds/Sel d’arsenic	32

Il a été considéré que la saumure arrivant dans le stockage sera à pH alcalin (11 – 12) et chargée en chlorure de potassium et chlorure de sodium

1 Interaction avec le chlorure de baryum

Le chlorure de baryum (BaCl_2) est un composé chimique composé de l'anion chlorure (Cl^-) et du cation baryum (Ba^{2+}).

a Chlorure de baryum/Cyanure de métaux alcalins

Les cyanures de métaux alcalins sont formés de l'anion cyanure (CN^-) et de cations métalliques pouvant être du sodium (Na^+) ou du potassium (K^+). Les réarrangements ioniques en solution aqueuse peuvent donner les molécules suivantes :

	KCN	NaCN	BaCl_2	$\text{Ba}(\text{CN})_2$	KCl	NaCl
Solubilité en g/l (Eau à 20°C)	500	587	358	800	342	359

La saumure sera saturée en KCl et NaCl, elle ne pourra pas accepter une plus grande quantité d'anion sodium et potassium. Les solubilités des molécules prises en compte dans cette interaction et celles pouvant être formées dans l'équilibre chimique sont du même ordre de grandeur. S'il y a interaction, elle sera sans doute négligeable. L'effet sera donc potentiellement sans conséquence.

b Chlorure de baryum/Nitrite-Nitrate de métaux alcalins

Les « nitrites-nitrates » de métaux alcalins sont formés de l'anion nitrite (NO_2^-) et de l'anion nitrate (NO_3^-) et de cations métalliques pouvant être du sodium (Na^+) ou du potassium (K^+). Les réarrangements ioniques en solution aqueuse peuvent donner les molécules suivantes :

	BaCl_2	NaNO_2	KNO_2	NaNO_3	KNO_3	BaNO_2	BaNO_3
Solubilité en g/l (Eau à 20°C)	358	808	3 060	876	316	675	90

Dans cette hypothèse d'interaction le chlorure de Baryum pourrait se solubiliser dans une solution de nitrite pour donner du nitrite de baryum très soluble. Le nitrite pouvant être apporté par le nitrite de potassium extrêmement soluble. Cette interaction entre le nitrite de potassium et le chlorure de baryum pourrait rendre le baryum plus mobile.

Par contre la présence de nitrate aura tendance à faire précipiter le Baryum, le nitrate de baryum étant moins soluble que le chlorure de baryum.

Dans cette hypothèse il est possible que l'effet négatif apporté par les nitrites soit compensé par les nitrates. Ce mélange peut avoir un effet neutre dans cette configuration ; l'effet négatif des nitrites peut être compensé par l'effet positif des nitrates.

2 Interaction nitrite-nitrate de métaux alcalins/Cyanure de métaux alcalins

Les « nitrites-nitrates » de métaux alcalins sont formés de l'anion nitrite (NO_2^-) et de l'anion nitrate (NO_3^-) et de cations métalliques pouvant être du sodium (Na^+) ou du potassium (K^+).

Les cyanures de métaux alcalins sont formés de l'anion cyanure (CN^-) et de cations métalliques pouvant être du sodium (Na^+) ou du potassium (K^+).

Les Nitrites/Nitrates et les cyanures ont les mêmes cations il n'y aura donc pas d'échange de cation possible.

Les nitrates peuvent oxyder les cyanures en cyanate, mais uniquement dans une solution acide.

Dans l'hypothèse d'une solution acide, il y aurait peu avoir une formation de cyanate (CNO^-), moins toxique que le cyanure, donc réaction plutôt favorable mais avec une génération de gaz (Azote et protoxyde d'azote).

L'oxydation des cyanures en cyanates avec les nitrites se réalise en milieu acide, dans ce cas-là il pourrait y avoir également formation de gaz (Monoxyde d'azote).

La solution dans la mine étant à pH alcalin, ce type de réaction n'aura pas lieu, ce mélange ne modifiera pas l'équilibre chimique de ce couple de déchets.

De plus, les sels de trempe sont un mélange de cyanure et de nitrite/nitrate, il n'y a donc aucune interaction entre eux.

3 Interaction Arséniates de métaux alcalins et alcalino-terreux

L'arséniate est un composé oxydé de l'arsenic de degré d'oxydation +5 -As(V)-. C'est un anion de formule AsO_4^{3-} qui s'associe avec des cations pour donner des molécules. Les cations retenus dans cette présente étude sont les cations issus de la famille des alcalins (sodium – Na^+ ; potassium – K^+ , ...) et ceux provenant de la famille des alcalino-terreux (calcium – Ca^{2+}).

a Arséniates/Cyanure de métaux alcalins

Les cyanures de métaux alcalins sont formés de l'anion cyanure (CN^-) et de cations métalliques pouvant être du sodium (Na^+) ou du potassium (K^+). Les réarrangements ioniques en solution aqueuse peuvent donner les molécules suivantes :

	$\text{K}_3(\text{AsO}_4)$ As(V)	$\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$ As(V)	KCN	NaCN
Solubilité en g/l (eau à 20°C)	190	0,13	500	587

Plusieurs associations métalliques ont été réalisées avec les arséniates pour les pesticides. Selon l'association, la molécule est soluble ou insoluble. Il n'est pas possible de conclure quelle est la proportion d'une molécule par rapport aux autres. Par défaut, il sera retenu qu'aucune interaction intervient dans ce couple arséniate/cyanure.

b Arséniate/Nitrite-Nitrate métaux alcalins

Les « nitrites-nitrates » de métaux alcalins sont des molécules différentes (Nitrite de métaux alcalins et Nitrate de métaux alcalins) mais de propriétés chimiques proches. Les nitrites sont formés de l'anion nitrite (NO^{2-}) et les nitrates de l'anion nitrate (NO^{3-}). Ils sont accompagnés de cations métalliques pouvant être du sodium (Na^+) ou du potassium (K^+).

Les réarrangements ioniques en solution aqueuse peuvent donner les molécules suivantes :

	$\text{K}_3(\text{AsO}_4)$ As(V)	$\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$ As(V)	KNO_3	NaNO_3	KNO_2	NaNO_2	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	$\text{Ca}(\text{NO}_2)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	$\text{Na}_3(\text{AsO}_4) \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ As(V)
Solubilité en g/l (eau à 20°C)	190	0,13	316	876	3060	808	121	85	Soluble

L'arséniate de potassium déjà soluble aura probablement peu d'impact sur les interactions avec les nitrites-nitrates.

La présence de sodium peut modifier l'équilibre de solubilité de l'arséniate de calcium et entraîner une légère dilution de l'arséniate de calcium pour former de l'arséniate de sodium soluble. Le calcium libéré peut entraîner la précipitation de sel de nitrite-nitrate. L'interaction vis-à-vis de l'arséniate de calcium est donc négative elle libère de l'arsenic mobile.

Une réduction de l'arséniate par du nitrite donnant de l'anhydride arsénieux (soluble) pourrait être envisageable, mais cette réaction est réalisée en milieu acide.

c Arséniate/Chlorure de baryum

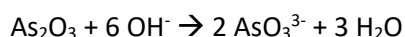
Le chlorure de baryum (BaCl_2) est un composé chimique composé de l'anion chlorure (Cl^-) et du cation baryum (Ba^{2+}). Les réarrangements ioniques en solution aqueuse peuvent donner les molécules suivantes :

	$\text{K}_3(\text{AsO}_4)$ As(V)	$\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$ As(V)	BaCl_2	$\text{Ba}_3(\text{AsO}_4)_2$ As(V)	KCl	CaCl_2
Solubilité en g/l (eau à 20°C)	190	0,13	358	$2,59 \cdot 10^{-8}$	342	359

Le chlorure de baryum très soluble va libérer le cation baryum, qui pourra trouver une affinité avec l'arséniate libéré par l'arséniate de potassium soluble. Cette rencontre peut donner un sel d'arséniate de baryum insoluble. Cette interaction aura tendance à fixer l'arsenic, donc l'interaction est positive.

d Arséniate/Trioxyle d'arsenic

Le trioxyle d'arsenic (appelé également anhydride arsénieux) est un oxyde d'arsenic de degré d'oxydation +3 – As(III) – En solution aqueuse alcaline (pH basique), cas de la saumure provenant de la mine, il forme de l'arsénite (AsO_3^{3-}) selon la réaction suivante :



Suite à l'hydrolyse du trioxyle d'arsenic, les réarrangements ioniques en solution aqueuse peuvent donner les molécules suivantes :

	$\text{K}_3(\text{AsO}_4)$ As(V)	$\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$ As(V)	As_2O_3 As(III)	K_3AsO_3 As(III)	$\text{Ca}_3(\text{AsO}_3)_2$ As(III)
Solubilité en g/l (eau à 20°C)	190	0,13	37	Pas de donnée	Pas de donnée

Les arsénites et plus largement les arsenics de degré d'oxydation (III) sont en général des sels solubles.

L'arsénite ne va pas se combiner avec l'arséniate ce sont deux anions. L'arsénite ne peut pas interagir avec l'arséniate. Il n'y aura donc pas d'interaction.

e Arséniate/Chlorure de mercure

Le chlorure de mercure existe sous 2 formes chimiques, le chlorure mercurieux (Hg_2Cl_2) et le chlorure mercurique (HgCl_2). Les deux formes sont composées de l'anion chlorure (Cl^-). Le chlorure mercurieux est composé du mercure de degré d'oxydation +1 -Hg(I)- et le chlorure mercurique est composé du mercure de degré d'oxydation +2 -Hg(II)-. Les réarrangements ioniques en solution aqueuse peuvent donner les molécules suivantes :

	$\text{K}_3(\text{AsO}_4)$ As(V)	$\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$ As(V)	HgCl_2 Hg(II)	Hg_2Cl_2 Hg(I)	$\text{Hg}_3(\text{AsO}_4)_2$ Hg(II) As(V)	$\text{Hg}_6(\text{AsO}_4)_2$ Hg (I) As(V)	KCl	CaCl_2
Solubilité en g/l (eau à 20°C)	190	0,13	65,7	$3,25 \cdot 10^{-4}$	Peu soluble	Pas de donnée	342	359

Dans le cas où le chlorure de mercure est sous forme de chlorure mercurique (HgCl_2), l'ion mercurique libéré peut se combiner avec l'arséniate libéré par l'arséniate de potassium. Cette association donnera un arséniate mercurique peu soluble. Cette interaction fait précipiter les ions mercuriques donc l'interaction est favorable à l'immobilisation du mercure. Le chlorure mercurieux étant pratiquement insoluble, aucune interaction est à prévoir avec cette molécule.

f Arséniate/Sulfate de mercure

Le sulfate de mercure peut être sous 2 formes chimiques, le sulfate mercurieux (Hg_2SO_4) et le sulfate mercurique (HgSO_4). Les deux formes sont composées de l'anion sulfate (SO_4^{2-}). Le sulfate mercurieux est composé du mercure de degré d'oxydation +1 -Hg(I)- et le sulfate mercurique est composé du mercure de degré d'oxydation +2 -Hg(II)-. Les réarrangements ioniques en solution aqueuse peuvent donner les molécules suivantes :

	$\text{K}_3(\text{AsO}_4)$ As(V)	$\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$ As(V)	Hg_2SO_4 Hg(I)	HgSO_4 Hg(II)	$\text{Hg}_6(\text{AsO}_4)_2$ Hg(I) ; As(V)
Solubilité en g/l (eau à 20°C)	190	0,13	0,4	Hydrolyse en $\text{HgSO}_4 \cdot 2\text{HgO} + 2 \text{H}_2\text{SO}_4$	Pas de donné

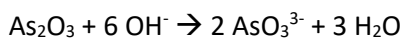
Le sulfate mercurieux se décompose en présence d'eau pour donner de l'acide sulfurique et un solide. Il n'y aura aucune interaction sur les arsénates, bien que l'apport d'acide puisse améliorer la solubilité des arsénates. Mais cette acidité sera neutralisée par la saumure alcaline.

Le sulfate mercurique est peu soluble. Il donne de l'arséniate mercurique probablement insoluble comme la majorité des arsenics de degré d'oxydation V. Seuls les arsénates de sodium et potassium font exception à cette règle.

L'interaction est donc positive.

4 Interaction avec le trioxyde d'arsenic

Le trioxyde d'arsenic (appelé également anhydride arsénieux) est un oxyde d'arsenic de degré d'oxydation +3 – As(III) – En solution aqueuse alcaline (pH basique), cas de la saumure provenant de la mine, il forme de l'arsénite (AsO_3^{3-}) selon la réaction suivante :



a Trioxyde d'arsenic/Cyanure de métaux alcalins

Les cyanures de métaux alcalins sont formés de l'anion cyanure (CN^-) et de cations métalliques pouvant être du sodium (Na^+) ou du potassium (K^+). Les réarrangements ioniques en solution aqueuse peuvent donner les molécules suivantes :

	As_2O_3 As(III)	KCN	NaCN	K_3AsO_3 As(III)	Na_3AsO_3 As(III)
Solubilité en g/l (Eau à 20°C)	37	500	587	Soluble	Soluble

Cette interaction ne modifiera pas la concentration en cyanure. En ce qui concerne l'arsenic, le milieu alcalin va entraîner une dissolution du trioxyde d'arsenic, il sera donc plus mobile. Mais par contre vis-à-vis du cyanure dans le cas présent, il n'y aura pas d'incidence sur la mobilité du cyanure. L'interaction arsénite/sel de cyanure sera potentiellement négligeable.

Du point de vue de l'oxydation des cyanures par le trioxyde d'arsenic, cette réaction n'aura pas lieu car le couple redox $\text{As}_2\text{O}_3/\text{As}$ (0,23 V) étant plus faible que le couple redox CNO^-/CN^- (0,97 V), le trioxyde d'arsenic ne peut pas oxyder les cyanures.

b Trioxyde d'arsenic/Nitrite-Nitrate de métaux alcalins

Les « nitrites-nitrates » de métaux alcalins sont des molécules différentes (Nitrite de métaux alcalins et Nitrate de métaux alcalins) mais de propriétés chimiques proches. Les nitrites sont formés de l'anion nitrite (NO_2^-) et les nitrates de l'anion nitrate (NO_3^-). Ils sont accompagnés de cations métalliques pouvant être du sodium (Na^+) ou du potassium (K^+).

Les réarrangements ioniques en solution aqueuse peuvent donner les molécules suivantes :

	As_2O_3	KNO_2	NaNO_3	KNO_3	K_2HASO_3 As(III)	Na_2HASO_3 As(III)
Solubilité en g/l (eau à 20°C)	37	3 060	876	316	Soluble	Soluble

Cet anion d'arsénite peut se coupler avec les cations alcalins solubles. Comme vu précédemment, compte tenu du manque de données (solubilité des arsénites de potassium et sodium), il n'est pas possible de conclure sur l'effet bénéfique des cations potassium et sodium sur le trioxyde d'arsenic en solution. Il est considéré par défaut qu'il n'y a pas d'interaction.

Le trioxyde d'arsenic peut être réduit par le nitrate et nitrique en formant de l'acide arsénique très soluble et des gaz NO_x . Mais cette réaction est réalisée en milieu acide. Elle n'aura donc pas lieu. Il n'y aura donc aucune interaction.

c Trioxyde d'arsenic/Chlorure de Baryum

Le chlorure de baryum ($BaCl_2$) est un composé chimique composé de l'anion chlorure (Cl^-) et du cation baryum (Ba^{2+}). Les réarrangements ioniques en solution aqueuse peuvent donner les molécules suivantes :

	As_2O_3 As(III)	$BaCl_2$	$Ba_3(AsO_3)_2$ As(III)	$Ba(HAsO_3)$ As(III)
Solubilité en g/l (eau à 20°C)	37	358	Absence de donnée	Absence de donnée

Comme pour les sels de potassium et sodium, il n'y a pas de donnée sur l'arsénite de baryum, il n'est pas possible de statuer sur l'interaction positive ou négative du baryum sur l'anion arsénite. Par défaut, il est considéré qu'il n'y a pas d'interaction.

d Trioxyde d'arsenic/Chlorure de mercure

Le chlorure de mercure existe sous 2 formes chimiques, le chlorure mercurieux (Hg_2Cl_2) et le chlorure mercurique ($HgCl_2$). Les deux formes sont composées de l'anion chlorure (Cl^-). Le chlorure mercurieux est composé du mercure de degré d'oxydation +1 -Hg(I)- et le chlorure mercurique est composé du mercure de degré d'oxydation +2 -Hg(II)-. Les réarrangements ioniques en solution aqueuse peuvent donner les molécules suivantes :

	As_2O_3 As(III)	Hg_2Cl_2 Hg(I)	$HgCl_2$ Hg(II)	$Hg_6(AsO_3)_2$ Hg (I) As(V)	$Hg_3(AsO_3)_2$ Hg(II) As(III)
Solubilité en g/l (eau à 20°C)	37	$3,25 \cdot 10^{-4}$	65,7	Absence de donnée	Absence de donnée

Aucune donnée n'a été trouvée dans la littérature sur l'arsénite mercurique ou mercurieux. Par défaut, il est considéré qu'il n'y a pas d'interaction entre le trioxyde d'arsenic et le chlorure de mercure.

e Trioxyde d'arsenic/Sulfate de mercure

Le sulfate de mercure peut être sous 2 formes chimiques, le sulfate mercurieux (Hg_2SO_4) et le sulfate mercurique ($HgSO_4$). Les deux formes sont composées de l'anion sulfate (SO_4^{2-}). Le sulfate mercurieux est composé du mercure de degré d'oxydation +1 -Hg(I)- et le sulfate mercurique est composé du mercure de degré d'oxydation +2 -Hg(II)-. Les réarrangements ioniques en solution aqueuse peuvent donner les molécules suivantes :

	As_2O_3 As(III)	Hg_2SO_4 Hg(I)	$HgSO_4$ Hg(II)	$Hg_6(AsO_3)_2$ Hg(I) ; As(III)	$Hg_2(HAsO_3)$ Hg(I) ; As(III)
Solubilité en g/l (eau à 20°C)	37	0,4	Hydrolyse en $HgSO_4 \cdot 2HgO + 2 H_2SO_4$	Absence de donnée	Absence de donnée

Le trioxyde d'arsenic pourrait se combiner avec les sels de mercure pour former des arsénites de mercure.

Aucune donnée n'a été trouvée dans la littérature sur l'arsénite mercurieux $Hg_6(AsO_3)_2$ ou $Hg_2(HAsO_3)$ montrant qu'il est soluble ou insoluble. Par défaut, il est considéré qu'il n'y a pas d'interaction entre le trioxyde d'arsenic et le chlorure de mercure.

Par contre, l'hydrolyse du sulfate mercurique $HgSO_4$, génère de l'acide sulfurique. Cela peut entraîner la réduction du pH de la saumure et, de ce fait, diminuer la solubilité du trioxyde d'arsenic. Cette interaction serait donc positive et limiterait la mobilité du trioxyde d'arsenic. Ce sulfate mercurique peut venir de deux CAP dont l'un représente plus de la moitié de la catégorie B5 – Déchets mercuriels. Sachant que 96% du mercure a été déstocké, la génération d'acide sulfurique sera moindre que l'apport d'alcalinité de la saumure dans le stockage. L'interaction sera de ce fait négligeable.

5 Interaction Oxyde de chrome (III)/autres éléments

L'oxyde de chrome (III) est la forme oxydée du chrome de degré d'oxydation +3 - Cr(III) - . Il est insoluble dans l'eau mais se dissout dans l'acide en produisant des ions de chrome hydratés $\text{Cr}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$. Il se dissout dans les bases alcalines concentrées en donnant des ions $\text{Cr}_2\text{O}_4^{2-}$.

La saumure au contact de ces oxyde de chrome (III) n'est ni acide ni une base alcaline concentrée, de ce fait l'oxyde de chrome (III) restera insoluble et n'interagira pas avec les autres molécules du stockage.

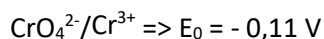
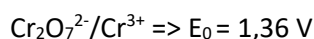
	Cr₂O₃
Solubilité en g/l (eau à 20°C)	Insoluble

6 Interaction Chromate et bichromate de métaux alcalin

Les chromates (CrO_4^{2-}) et bichromates ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$) sont des éléments du chrome de degré d'oxydation +6 – Cr(VI). Le Cr (VI) du point de vue de la santé est un agent CMR (Cancérogène, Mutagène et Reprotoxique) contrairement au Cr (III) vu précédemment.

Les chromates (surtout les bichromates) sont des anions oxydants très puissants. Ils peuvent oxyder les molécules pour leur donner une forme plus ou moins soluble.

Les potentiels d'oxydoréduction de ces deux anions sont les suivants :



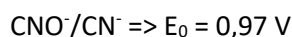
Ne sachant pas avec quels cations métalliques ils sont associés, il n'est pas possible de d'étudier les interactions concernant la solubilité des ions.

a Chromate & bichromate/cyanure de métaux alcalins

Les cyanures de métaux alcalins sont formés de l'anion cyanure (CN^-) et de cations métalliques pouvant être du sodium (Na^+) ou du potassium (K^+). Les réarrangements ioniques en solution aqueuse peuvent donner les molécules suivantes :

	M_x(CrO₄)_y	M_x(Cr₂O₇)_y	KCN	NaCN
Solubilité en g/l (eau à 20°C)	Plus ou moins soluble en fonction du métal associé	Plus ou moins soluble en fonction du métal associé	500	587

Le couple d'oxydation du cyanure est le suivant :



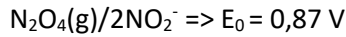
Le potentiel oxydant du bichromate ($E_0 = 1,36 \text{ V}$) étant plus élevé que le potentiel réducteur du cyanure ($E_0 = -0,97 \text{ V}$) la réaction d'oxydation du cyanure en cyanate par le bichromate est envisageable.

Le cyanure sera donc oxydé par le bichromate pour donner un sel de chrome (III) moins toxique et non CMR par rapport au chrome (VI) et des ions cyanates moins toxiques que les ions cyanures. Le mélange perdra en toxicité. L'interaction entre ces espèces sera de ce fait plutôt favorable si les conditions de réaction sont réunies.

b Chromate & bichromate/Nitrite-Nitrate de métaux alcalins

Les « nitrites-nitrates » de métaux alcalins sont des molécules différentes (Nitrite de métaux alcalins et Nitrate de métaux alcalins) mais de propriétés chimiques proches. Les nitrites sont formés de l'anion nitrite (NO_2^-) et les nitrates de l'anion nitrate (NO_3^-). Ils sont accompagnés de cations métalliques pouvant être du sodium (Na^+) ou du potassium (K^+).

Les couples rédox pour le nitrite est le suivant :



Le nitrate étant la forme de l'azote (N) la plus oxydée, il n'est pas possible de l'oxyder.

En théorie le bichromate peut oxyder les sels de nitrite en peroxyde d'azote qui s'hydrolysera en présence d'eau pour donner de l'acide nitrique et des NO_x . Cette réaction est possible dans des conditions très particulières non réunies dans la mine.

Il n'y a probablement pas d'interaction entre les nitrites-nitrates et le bichromate.

c Chromate & bichromate/Chlorure de baryum

Le chlorure de baryum (BaCl_2) est un composé chimique composé de l'anion chlorure (Cl^-) et du cation baryum (Ba^{2+}).

Le cation baryum Ba^{2+} est la forme oxydée du baryum. Le chromate ou bichromate n'aura aucune action sur ce cation.

Il n'y a donc aucune interaction entre les chromates/dichromates et le chlorure de baryum.

d Chromate & bichromate/Arséniates

L'arséniate est un composé oxydé de l'arsenic de degré d'oxydation +5 -As(V)-. C'est un anion de formule AsO_4^{3-} .

Les arséniates ont le degré d'oxydation le plus élevé de l'arsenic : As(V). Ils ne seront donc pas oxydés par le chromate ou bichromate. Il n'y aura aucune interaction entre ces deux familles de composants.

e Chromate & bichromate/Trioxyde d'arsenic

Le trioxyde d'arsenic (appelé également anhydride arsénieux) est un oxyde d'arsenic de degré d'oxydation +3 – As(III)

Le bichromate peut éventuellement oxyder le trioxyde d'arsenic en pentoxyde d'arsenic.

Le pentoxyde d'arsenic est très soluble 150g/l à 16°C. Le trioxyde d'arsenic est moins soluble 37 g/l à 20°C.

Cette interaction peut rendre l'arsenic plus mobile, elle est donc négative vis-à-vis du stockage.

f Chromate & bichromate/chlorure et sulfate de mercure

Le chlorure de mercure existe sous 2 formes chimiques, le chlorure mercureux (Hg_2Cl_2) et le chlorure mercurique (HgCl_2). Les deux formes sont composées de l'anion chlorure (Cl^-). Le chlorure mercureux est composé du mercure de degré d'oxydation +1 -Hg(I)- et le chlorure mercurique est composé du mercure de degré d'oxydation +2 -Hg(II)-.

Il en est de même pour le sulfate de mercure. Le sulfate de mercure peut être sous 2 formes chimiques, le sulfate mercureux (Hg_2SO_4) et le sulfate mercurique (HgSO_4). Les deux formes sont composées de l'anion sulfate (SO_4^{2-}). Le sulfate mercureux est composé du mercure de degré d'oxydation +1 -Hg(I)- et le sulfate mercurique est composé du mercure de degré d'oxydation +2 -Hg(II)-.

	Hg_2Cl_2 Hg(I)	HgCl_2 Hg(II)	Hg_2SO_4 Hg(I)	HgSO_4 Hg(II)
Solubilité en g/l (eau à 20°C)	$3,25 \cdot 10^{-4}$	65,7	0,4	Hydrolyse en $\text{HgSO}_4 \cdot 2\text{HgO} + 2 \text{H}_2\text{SO}_4$

Le potentiel redox du couple $\text{Hg}^{2+}(\text{aq})/\text{Hg}_2^{2+}$ est de 0,91 V. L'ion mercurique peut être oxydé par le dichromate en formant l'ion mercureux.

Donc Hg_2Cl_2 peut être oxydé en HgCl_2 ce qui va augmenter la mobilité du mercure compte tenu de la différence de solubilité entre Hg_2Cl_2 et HgCl_2 . L'interaction est potentiellement négative.

Il n'y aura aucune action sur la molécule HgSO_4 car elle se décompose en présence d'eau en un solide stable.

7 Interaction avec le Chlorure de mercure

Le chlorure de mercure existe sous 2 formes chimiques, le chlorure mercureux (Hg_2Cl_2) et le chlorure mercurique (HgCl_2). Les deux formes sont composées de l'anion chlorure (Cl^-). Le chlorure mercureux est composé du mercure de degré d'oxydation +1 -Hg(I)- et le chlorure mercurique est composé du mercure de degré d'oxydation +2 -Hg(II)-.

a Chlorure de mercure/Cyanure de métaux alcalins

Les cyanures de métaux alcalins sont formés de l'anion cyanure (CN^-) et de cations métalliques pouvant être du sodium (Na^+) ou du potassium (K^+). Les réarrangements ioniques en solution aqueuse peuvent donner les molécules suivantes :

	Hg_2Cl_2 Hg(I)	HgCl_2 Hg(II)	KCN	NaCN	Hg_2CN_2 Hg(I)	$\text{Hg}(\text{CN})_2$ Hg(II)
Solubilité en g/l (eau à 20°C)	$3,3 \cdot 10^{-4}$	66	500	587	$2,3 \cdot 10^{-11}$	93

Le chlorure mercureux - Hg(I) - est pratiquement insoluble, cette molécule dans ce scénario d'interaction n'est pas mobilisable.

Le chlorure mercurique - Hg(II) - plus soluble, pourra se combiner avec les sels de cyanure très solubles, pour donner du cyanure mercurique, dont la solubilité est du même ordre de grandeur que le chlorure mercurique.

Donc du point de vue de la mobilité du mercure, il n'y a pas de modification. Par contre le cyanure mercurique -Hg(II)- est moins soluble que les cyanures de sel métallique. Les sels mercuriques -Hg(II)- ont donc la possibilité de piéger en partie les cyanures sous la forme de cyanure mercurique Hg(II).

Cette interaction peut être donc positive du point de vue du cyanure.

b Chlorure de mercure/Nitrite-Nitrate de métaux alcalins

Les « nitrites-nitrates » de métaux alcalins sont des molécules différentes (Nitrite de métaux alcalins et Nitrate de métaux alcalins) mais de propriétés chimiques proches. Les nitrites sont formés de l'anion nitrite (NO_2^-) et les nitrates de l'anion nitrate (NO_3^-). Ils sont accompagnés de cations métalliques pouvant être du sodium (Na^+) ou du potassium (K^+). Les réarrangements ioniques en solution aqueuse peuvent donner les molécules suivantes :

	HgCl_2 Hg(II)	Hg_2Cl_2 Hg(I)	KNO_3	NaNO_3	KNO_2	NaNO_2	$\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$ Hg(II)	$\text{Hg}(\text{NO}_2)_2$ Hg(II)
Solubilité en g/l (Eau à 20°C)	66	$3,3 \cdot 10^{-4}$	316	876	3060	808	Soluble	Absence de donnée

Les nitrites et nitrates ne vont pas oxyder les sels de mercure qui sont déjà une forme oxydée du mercure métal. La valeur de la solubilité du nitrate de mercure n'est pas indiquée, mais la littérature indique que cette molécule est soluble. Par défaut nous allons considérer que le nitrate mercurique - $[\text{Hg}(\text{NO}_3)_2]$ est plus soluble que le chlorure mercurique (HgCl_2). Le fort excès de nitrate devrait favoriser la solubilisation du mercure. Le mercure serait donc de ce fait plus mobilisable. L'interaction est donc négative.

c Chlorure de mercure/Chlorure de baryum

Le chlorure de baryum (BaCl_2) est un composé chimique composé de l'anion chlorure (Cl^-) et du cation baryum (Ba^{2+}).

Les deux molécules possèdent les mêmes anions (Cl^-), il n'y aura donc aucun échange d'ions entre ces molécules. Aucune interaction devrait avoir lieu.

8 Interaction Sulfate de mercure

Le sulfate de mercure peut être sous 2 formes chimiques, le sulfate mercurieux (Hg_2SO_4) et le sulfate mercurique (HgSO_4). Les deux formes sont composées de l'anion sulfate (SO_4^{2-}). Le sulfate mercurieux est composé du mercure de degré d'oxydation +1 -Hg(I)- et le sulfate mercurique est composé du mercure de degré d'oxydation +2 -Hg(II).

a Sulfate de mercure/Cyanures de métaux alcalins

Les cyanures de métaux alcalins sont formés de l'anion cyanure (CN^-) et de cations métalliques pouvant être du sodium (Na^+) ou du potassium (K^+). Les réarrangements ioniques en solution aqueuse peuvent donner les molécules suivantes :

	Hg_2SO_4 Hg(I)	HgSO_4 Hg(II)	KCN	NaCN	$\text{Hg}_2(\text{CN})_2$ Hg(I)
Solubilité en g/l (eau à 20°C)	0,4	Hydrolyse en $\text{HgSO}_4 \cdot 2\text{HgO}$ $+ 2 \text{H}_2\text{SO}_4$	500	587	$2,27 \cdot 10^{-11}$

Le sulfate mercurieux (Hg_2SO_4) est faiblement soluble il peut interagir avec les cyanures fortement solubles pour donner du cyanure mercurieux insoluble. La réaction d'interaction limite légèrement la mobilité du mercure et des cyanures. L'interaction devrait être positive mais relativement faible vue la faible solubilité du sulfate mercurieux.

Le sulfate mercurique, s'hydrolyse en sel insoluble de mercure et en acide sulfurique. L'acide sulfurique interagit avec les cyanures pour donner du cyanure d'hydrogène en milieu acide. Ce sulfate mercurique peut venir de deux CAP dont l'un représente plus de la moitié de la catégorie B5 – Déchets mercuriels. Sachant que 96% du mercure a été déstocké, la génération d'acide sulfurique sera moindre que l'apport d'alcalinité de la saumure dans le stockage.

b Sulfate de mercure/nitrites-nitrates de métaux alcalins

Les « nitrites-nitrates » de métaux alcalins sont des molécules différentes (Nitrite de métaux alcalins et Nitrate de métaux alcalins) mais de propriétés chimiques proches. Les nitrites sont formés de l'anion nitrite (NO_2^-) et les nitrates de l'anion nitrate (NO_3^-). Ils sont accompagnés de cations métalliques pouvant être du sodium (Na^+) ou du potassium (K^+). Les réarrangements ioniques en solution aqueuse peuvent donner les molécules suivantes :

	Hg_2SO_4 Hg(I)	HgSO_4 Hg(II)	KNO_3	NaNO_3	KNO_2	NaNO_2	$\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$ Hg(II)	$\text{Hg}(\text{NO}_2)_2$ Hg(II)
Solubilité en g/l (eau à 20°C)	0,4	Hydrolyse en $\text{HgSO}_4 \cdot 2\text{HgO} + 2 \text{H}_2\text{SO}_4$	316	876	3060	808	Soluble	Absence de donnée

Le sulfate mercureux (Hg_2SO_4) est faiblement soluble il peut interagir avec les nitrites/nitrates fortement solubles pour donner du Nitrate-Nitrite mercureux solubles. La réaction d'interaction peut augmenter la mobilité du mercure. L'interaction sera négative mais relativement faible compte tenu de la faible solubilité du sulfate mercureux – Hg(I).

Le sulfate mercurique - Hg(II), s'hydrolyse en sel insoluble de mercure et en acide sulfurique. L'acide sulfurique interagit avec le nitrate (NO_3^-) pour donner de l'acide nitrique particulièrement oxydant et avec le nitrite (NO_2^-) pour donner de l'acide nitreux instable qui va se décomposer en acide nitrique et en monoxyde d'azote (NO) gazeux. Ce sulfate mercurique peut venir de deux CAP dont l'un représente plus de la moitié de la catégorie B5 – Déchets mercuriels. Sachant que 96% du mercure a été déstocké, la génération d'acide sulfurique sera moindre que l'apport d'alcalinité de la saumure dans le stockage. Ces réactions défavorables au stockage n'auront pas lieu.

c Sulfate de mercure/Chlorure de baryum

Le chlorure de baryum (BaCl_2) est un composé chimique composé de l'anion chlorure (Cl^-) et du cation baryum (Ba^{2+}). Les réarrangements ioniques en solution aqueuse peuvent donner les molécules suivantes :

	Hg_2SO_4 Hg(I)	HgSO_4 Hg(II)	BaCl_2	BaSO_4	Hg_2Cl_2 Hg(I)
Solubilité en g/l (eau à 20°C)	0,4	Hydrolyse en $\text{HgSO}_4 \cdot 2\text{HgO} + 2 \text{H}_2\text{SO}_4$	358	$2,45 \cdot 10^{-3}$	$3,25 \cdot 10^{-4}$

Le Chlorure de baryum est très soluble et va générer un excès de chlorure. Cet excès de chlorure pourrait interagir avec les cations mercures(I) issus de la faible solubilité du sulfate mercureux. Cette interaction entrainera une précipitation des mercures présents en solution qui est déjà relativement faible (0,4 g/l). L'interaction serait positive bien que faible.

La faible concentration des sulfates liés au sulfate de mercureux Hg_2SO_4 va entrainer une précipitation des sels de baryum qui sera limitée par la faible disponibilité en sulfate. L'interaction serait positive bien que faible.

Le sulfate mercurique HgSO_4 , s'hydrolyse en sel insoluble de mercure et en acide sulfurique. La quantité d'acide sulfurique produit au regard de la quantité de saumure à pH alcalin provenant de l'ennoyage de la mine aura un impact nul vis-à-vis du pH de la solution saline.

9 Interaction avec le béryllium

Le béryllium est un métal qui est facilement corrodé en milieu salin saturé d'eau. Le béryllium va se décomposer en cation Be^{2+} . Ce cation pourra interagir avec les anions présents dans la mine. Le béryllium est l'élément le plus léger des alcalino-terreux. Cette famille regroupe également le magnésium, calcium, Strontium, baryum et radium.

a Béryllium/Cyanure de métaux alcalins

Les cyanures de métaux alcalins sont formés de l'anion cyanure (CN^-) et de cations métalliques pouvant être du sodium (Na^+) ou du potassium (K^+). Les réarrangements ioniques en solution aqueuse peuvent donner les molécules suivantes :

	KCN	NaCN	$\text{Be}(\text{CN})_2$	$\text{Ca}(\text{CN})_2$	$\text{Ba}(\text{CN})_2$
Solubilité en g/l (eau à 20°C)	500	587	Absence de donnée	Soluble	80 g/l

Il n'existe pas de donnée sur la solubilité du cyanure de béryllium, par contre certains cyanures de métaux alcalino-terreux comme le cyanure de calcium $\text{Ca}(\text{CN})_2$ et cyanure de baryum ($\text{Ba}(\text{CN})_2$) sont indiqués comme étant des molécules solubles. De ce fait le cyanure de béryllium est probablement soluble. Il n'y aura pas de précipitation de cyanure ou de béryllium. L'interaction entre ces deux éléments sera donc nulle.

b Béryllium/Nitrites-Nitrates de métaux alcalins

Les « nitrites-nitrates » de métaux alcalins sont des molécules différentes (Nitrite de métaux alcalins et Nitrate de métaux alcalins) mais de propriétés chimiques proches. Les nitrites sont formés de l'anion nitrite (NO_2^-) et les nitrates de l'anion nitrate (NO_3^-). Ils sont accompagnés de cations métalliques pouvant être du sodium (Na^+) ou du potassium (K^+).

La comparaison de solubilité du nitrate et nitrite de béryllium sera comparé avec le chlorure de béryllium (BeCl_2), chlorure provenant de la saumure. Les réarrangements ioniques en solution aqueuse peuvent donner les molécules suivantes :

	BeCl_2	KNO_3	NaNO_3	KNO_2	NaNO_2	$\text{Be}(\text{NO}_3)_2$	$\text{Be}(\text{NO}_2)_2$
Solubilité en g/l (eau à 20°C)	420	316	876	3060	808	1 080	Absence de donnée

La présence de nitrate peut augmenter la solubilisation du béryllium et des nitrates. En absence de donnée sur le nitrite de béryllium, il n'est pas possible d'estimer les conséquences liées à cet anion. Au global l'interaction retenue est négative.

c Béryllium/Chlorure de baryum

Le chlorure de baryum (BaCl_2) est un composé chimique composé de l'anion chlorure (Cl^-) et du cation baryum (Ba^{2+}).

Seul l'anion du chlorure de baryum peut influencer la solubilité du cation béryllium (Be^{2+}). Les anions chlorures étant déjà en quantité importante dans la saumure, l'apport de chlorure par le chlorure de baryum sera négligeable. Il n'y aura aucune interaction entre le béryllium et le chlorure de baryum.

d Béryllium/Arséniate

L'arséniate est un composé oxydé de l'arsenic de degré d'oxydation +5 -As(V)-. C'est un anion de formule AsO_4^{3-} . Les réarrangements ioniques en solution aqueuse peuvent donner les molécules suivantes :

	$\text{K}_3(\text{AsO}_4)$ As(V)	$\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$ As(V)	$\text{Be}_3(\text{AsO}_4)_2$ As(V)
Solubilité en g/l (eau à 20°C)	190	0,13	Absence de donnée

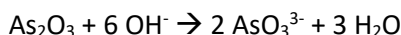
La solubilité de l'arséniate de béryllium n'est pas indiquée dans la littérature. Par contre la solubilité de quelques arséniate d'alcalino-terreux (même famille que le béryllium) sont définis et présentés dans le tableau suivant :

	$\text{Be}_3(\text{AsO}_4)_2$ As(V)	$\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$ As(V)	$\text{Ba}_3(\text{AsO}_4)_2$ As(V)
Solubilité en g/l (eau à 20°C)	Absence de donnée	0,13	0,00000003

A la vue du tableau de solubilité des arséniate de métaux d'alcalino-terreux ci-dessus, plus l'atome d'alcalino-terreux est léger, plus la solubilité est importante, toute en restant faible. La solubilité de l'arséniate de béryllium est sans doute plus faible que l'arséniate de potassium. L'apport de cation de béryllium dans la saumure va précipiter partiellement l'arséniate de potassium en arséniate de béryllium. La mobilité du béryllium est des arséniate sera de ce fait moins importante, l'interaction est donc positive.

e Béryllium/Trioxys d'arsenic

Le trioxys d'arsenic (appelé également anhydride arsénieux) est un oxyde d'arsenic de degré d'oxydation +3 – As(III) – En solution aqueuse alcaline (pH basique), cas de la saumure provenant de la mine, il forme de l'arsénite (AsO_3^{3-}) selon la réaction suivante :



Il n'existe pas de donnée sur l'arsénite de béryllium, par contre la littérature indique que l'arsénite de calcium est peu soluble. Le béryllium et le calcium faisant partie de la même famille chimique des métaux alcalino-terreux, l'arsénite de béryllium est certainement insoluble voir peu soluble.

Le béryllium va de ce fait faire précipiter partiellement les arsénites disponibles dans la saumure sous forme d'arsénite de béryllium. L'interaction est de ce fait positive.

f Béryllium/Chlorure de mercure

Le chlorure de mercure existe sous 2 formes chimiques, le chlorure mercurique (Hg_2Cl_2) et le chlorure mercurique (HgCl_2). Les deux formes sont composées de l'anion chlorure (Cl^-). Le chlorure mercurique est composé du mercure de degré d'oxydation +1 -Hg(I)- et le chlorure mercurique est composé du mercure de degré d'oxydation +2 – Hg(II).

Seul l'anion chlorure (Cl^-) des chlorures de mercure (Hg_2Cl_2 ou HgCl_2) peut influencer la solubilité du cation béryllium (Be^{2+}). Les anions chlorures étant déjà en quantité importante dans la saumure, l'apport de chlorure par les chlorures de mercure sera négligeable. Il n'y aura aucune interaction entre le béryllium et le chlorure de baryum.

g Béryllium/Sulfate de mercure

Le sulfate de mercure peut être sous 2 formes chimiques, le sulfate mercureux (Hg_2SO_4) et le sulfate mercurique (HgSO_4). Les deux formes sont composées de l'anion sulfate (SO_4^{2-}). Le sulfate mercureux est composé du mercure de degré d'oxydation +1 -Hg(I)- et le sulfate mercurique est composé du mercure de degré d'oxydation +2 – Hg(II).

Les réarrangements ioniques en solution aqueuse peuvent donner les molécules suivantes :

	BeCl₂	Hg₂SO₄ Hg(I)	HgSO₄ Hg(II)	Be(SO₄)
Solubilité en g/l (eau à 20°C)	420	0,4	Hydrolyse en $\text{HgSO}_4 \cdot 2\text{HgO} + 2$ H_2SO_4	390

Les chlorures étant majoritaire dans la saumure, la molécule de chlorure de béryllium (BeCl_2) est retenue pour représenter le cation béryllium (Be^{2+}).

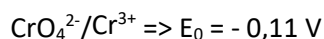
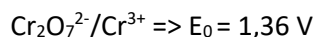
Les sulfates de mercure ne sont pas ou peu solubles. L'excès de chlorure dans la saumure va privilégier la formation de chlorure de béryllium au détriment du sulfate de béryllium. L'interaction peut rendre le sulfate mercureux plus mobile, mais vu l'excès de chlorure, cette interaction sera négligeable, elle sera notée nulle.

h Béryllium/Chromate et dichromate

Les chromates (CrO_4^{2-}) et bichromates ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$) sont des éléments du chrome de degré d'oxydation +6 – Cr(VI). Le Cr (VI) du point de vue de la santé est un agent CMR (Cancérogène, Mutagène et Reprotoxique) contrairement au Cr (III) vu précédemment.

Les chromates (surtout les bichromates) sont des anions oxydants très puissants. Ils peuvent oxyder les molécules pour leur donner une forme plus ou moins soluble.

Le potentiel d'oxydoréduction de ces deux anions sont les suivants :



Dans le cas le cas de pièce massive de béryllium métal, le béryllium ne sera pas totalement oxydé, une partie restera sous forme métallique Be^0 . Le béryllium métal étant un fort réducteur ($\text{Be}^{2+}/\text{Be} \Rightarrow -1,847 \text{ V}$), il peut être oxydé par le chromate et bichromate de potentiel rédox plus élevé. De ce fait le chrome (VI) va être réduit en Cr(III). Le chrome (III) étant non CMR contrairement au chrome (IV), l'interaction est positive du point de vue de la toxicité des produits présents.

Les CAP indiquent que le béryllium est présent sous forme d'objets manufacturés et de poussière. Il est donc possible d'avoir une interaction positive avec diminution de la toxicité par la réduction des chromes hexavalents en chromes trivalents.

10 Interaction avec l'oxyde de béryllium et les autres éléments

L'oxyde de béryllium, de formule chimique BeO , est un solide insoluble et inerte chimiquement. Il n'aura aucune interaction avec les autres éléments présents dans la mine.

11 Interaction avec les sels de plomb

Les sels de plomb sont constitués du cation plomb (Pb^{2+}) accolé avec un anion. Dans notre cas, l'anion est non définit. Les chlorures (Cl^-) étant en large excès avec l'apport de saumure, il est considéré que le sel de plomb est une molécule de chlorure de plomb ($PbCl_2$).

a Sels de plomb/cyanures de métaux alcalins

Les cyanures de métaux alcalins sont formés de l'anion cyanure (CN^-) et de cations métalliques pouvant être du sodium (Na^+) ou du potassium (K^+). Les réarrangements ioniques en solution aqueuse peuvent donner les molécules suivantes :

	$PbCl_2$	KCN	NaCN	$Pb(CN)_2$	KCl	NaCl
Solubilité en g/l (eau à 20°C)	10	500	587	Légèrement soluble	342	359

Le chlorure de plomb est légèrement soluble. Il sera au contact d'une saumure riche en chlorure qui va limiter sa solubilité. De ce fait il y aura peu de plomb disponible pour interagir avec le cyanure.

Si le plomb est disponible dans la saumure via un autre anion le rendant plus soluble, l'interaction sera positive par rapport à la mobilité des cyanures. En effet, le cyanure de plomb est moins soluble que le cyanure de potassium ou sodium. Il y aurait une précipitation partielle du cyanure du plomb. L'interaction est donc favorable vis-à-vis du cyanure.

b Sels de plomb/Nitrite-nitrate de métaux alcalins

Les « nitrites-nitrates » de métaux alcalins sont des molécules différentes (Nitrite de métaux alcalins et Nitrate de métaux alcalins) mais de propriétés chimiques proches. Les nitrites sont formés de l'anion nitrite (NO_2^-) et les nitrates de l'anion nitrate (NO_3^-). Ils sont accompagnés de cations métalliques pouvant être du sodium (Na^+) ou du potassium (K^+).

La comparaison de solubilité du nitrate et nitrite de métaux alcalins sera comparé avec le chlorure de plomb ($PbCl_2$), chlorure provenant de la saumure. Les réarrangements ioniques en solution aqueuse peuvent donner les molécules suivantes :

	$PbCl_2$	KNO_3	$NaNO_3$	KNO_2	$NaNO_2$	$Pb(NO_3)_2$	$Pb(NO_2)_2$
Solubilité en g/l (eau à 20°C)	10	316	876	3060	808	543	Absence de donnée

En absence de donnée sur le nitrite de plomb, il n'est pas possible de statuer sur cette interaction. Mais cependant le résultat doit être proche de la conclusion de l'interaction chlorure de plomb/nitrate de métaux alcalins.

Des nitrates seront libérés par les nitrates de potassium et sodium en solution. Ces nitrates peuvent interagir sur le chlorure de plomb pour rendre le plomb plus mobile Le nitrate de plomb étant plus soluble que le chlorure de plomb, l'interaction sera négative.

c Sels de plomb/Chlorure de baryum

Le chlorure de baryum ($BaCl_2$) est un composé chimique composé de l'anion chlorure (Cl^-) et du cation baryum (Ba^{2+}).

Les cations Ba^{2+} et Pb^{2+} ne peuvent pas se joindre pour former une molécule. Leur charge positive les repulse. Il n'est pas possible d'avoir d'interaction entre ces deux molécules.

d Sels de plomb/Arséniate

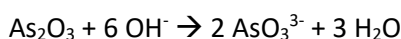
L'arséniate est un composé oxydé de l'arsenic de degré d'oxydation +5 -As(V)-. C'est un anion de formule AsO_4^{3-} . Les réarrangements ioniques en solution aqueuse peuvent donner les molécules suivantes :

	PbCl₂	K₃(AsO₄) As(V)	Ca₃(AsO₄)₂ As(V)	Pb₃(AsO₄)₂ As(V)
Solubilité en g/l (eau à 20°C)	10	190	0,13	Insoluble

La solubilité de l'arséniate de calcium et celle du chlorure de plomb peut engendrer la précipitation du cation Plomb (Pb^{2+}) et arséniate (AsO_4^{3-}) présent dans la saumure en arséniate de plomb insoluble. L'interaction est donc positive.

e Sels de plomb/Trioxyde d'arsenic

Le trioxyde d'arsenic (appelé également anhydride arsénieux) est un oxyde d'arsenic de degré d'oxydation +3 – As(III) – En solution aqueuse alcaline (pH basique), cas de la saumure provenant de la mine, il forme de l'arsénite (AsO_3^{3-}) selon la réaction suivante :



Suite à l'hydrolyse du trioxyde d'arsenic, les réarrangements ioniques avec le sel de plomb en solution aqueuse peuvent donner les molécules suivantes :

	As₂O₃ As(III)	PbCl₂	Pb₃(AsO₃)₂ As(III)
Solubilité en g/l (eau à 20°C)	37	10	Insoluble

La solubilité de l'arsénite de calcium et celle du chlorure de plomb peut engendrer la précipitation du cation Pb (Pb^{2+}) et arsénite (AsO_3^{3-}) présent dans la saumure en arsénite de plomb insoluble. L'interaction est donc positive.

f Sels de plomb/Chlorure de mercure

Le chlorure de mercure existe sous 2 formes chimiques, le chlorure mercureux (Hg_2Cl_2) et le chlorure mercurique (HgCl_2). Les deux formes sont composées de l'anion chlorure (Cl^-). Le chlorure mercureux est composé du mercure de degré d'oxydation +1 -Hg(I)- et le chlorure mercurique est composé du mercure de degré d'oxydation +2 – Hg(II).

Les cations mercure (Hg_2^{2+} ou Hg^{2+}) et plomb (Pb^{2+}) ne peuvent pas se joindre pour former une molécule. Leur charge positive les repulse. Il n'est pas possible d'avoir d'interaction entre ces deux molécules.

g Sels de plomb/Sulfate de mercure

Le sulfate de mercure peut être sous 2 formes chimiques, le sulfate mercureux (Hg_2SO_4) et le sulfate mercurique (HgSO_4). Les deux formes sont composées de l'anion sulfate (SO_4^{2-}). Le sulfate mercureux est composé du mercure de degré d'oxydation +1 -Hg(I)- et le sulfate mercurique est composé du mercure de degré d'oxydation +2 – Hg(II).

Les réarrangements ioniques en solution aqueuse peuvent donner les molécules suivantes :

	PbCl_2	Hg_2SO_4 Hg(I)	HgSO_4 Hg(II)	$\text{Pb}(\text{SO}_4)$	Hg_2Cl_2 Hg(I)
Solubilité en g/l (eau à 20°C)	10	0,4	Hydrolyse en $\text{HgSO}_4 \cdot 2\text{HgO} + 2\text{H}_2\text{SO}_4$	0,13	0,0003

Le sulfate de plomb – $\text{Pb}(\text{SO}_4)$ – est moins soluble que le chlorure de plomb – PbCl_2 . La faible quantité de sulfate - SO_4^{2-} - libéré par le sulfate mercureux peut entraîner la précipitation du plomb sous la forme de sulfate - $\text{Pb}(\text{SO}_4)$. Les sulfates du mercure captés par le plomb va libérer dans la solution les cations mercureux (Hg_2^{2+}). Ceux-ci au contact des chlorures de la saumure vont précipiter sous la forme de chlorure mercureux - Hg_2Cl_2 . L'interaction est donc positive.

h Sels de plomb/Chromate & bichromate

Les chromates (CrO_4^{2-}) et bichromates ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$) sont des éléments du chrome de degré d'oxydation +6 – Cr(VI). Le Cr (VI) du point de vue de la santé est un agent CMR (Cancérogène, Mutagène et Reprotoxique) contrairement au Cr (III).

Les chromates (surtout les bichromates) sont des anions oxydants très puissants. Ils peuvent oxyder les molécules pour leur donner une forme plus ou moins soluble.

Les sels de plomb sont la forme oxydée du plomb, il n'y aura donc pas d'oxydation des sels de plomb par le chromate ou dichromate. Seuls les réarrangements ioniques dans la saumure peuvent modifier l'équilibre entre les sels de plombs et les chromates et bichromates.

	PbCl_2	$\text{M}_x(\text{CrO}_4)_y$	$\text{M}_x(\text{Cr}_2\text{O}_7)_y$	$\text{Pb}(\text{CrO}_4)$	$\text{Pb}(\text{Cr}_2\text{O}_7)$
Solubilité en g/l (eau à 20°C)	10	Plus ou moins soluble en fonction du métal associé	Plus ou moins soluble en fonction du métal associé	0,0002	Absence de donnée

Le chlorure de plomb est plus soluble que le chromate de plomb. Le plomb disponible dans la saumure va probablement réagir avec le chromate disponible pour précipiter en chromate de plomb.

En ce qui concerne le bichromate de plomb, aucune donnée n'existe dans la littérature.

Les chromates vont rendre les sels de plomb moins solubles, l'interaction est donc positive.

i Sels de plomb/Béryllium

Le béryllium est un métal qui est facilement corrodé en milieu salin saturé d'eau. Le béryllium va se décomposer en cation Be^{2+} . Ce cation pourra interagir avec les anions présents dans la mine. Le béryllium est l'élément le plus léger des alcalino-terreux.

Les cations Be^{2+} et Pb^{2+} ne peuvent pas se joindre pour former une molécule. Leur charge positive les repulse. Il n'est pas possible d'avoir d'interaction entre ces deux molécules.

12 Interaction avec les sels d'arsenic

Les sels d'arsenic sont contenus dans la catégorie de déchet D12 – Déchets de laboratoire. Il n'est pas possible de déterminer le type d'arsenic [As(III) ou As(V)] présent dans cette catégorie de déchets.

Par défaut il a été additionné les effets d'interaction des As(III) – Trioxyde d'arsenic et des As(V) – arséniate.

13 Interaction avec la chaux

La chaux est le nom vulgarisé de l'hydroxyde de calcium Ca(OH)_2 . La chaux se dissocie partiellement dans l'eau en cation calcium Ca^{2+} et anion hydroxyle OH^- . La solution aqueuse de chaux est appelée lait de chaux et à un pH alcalin d'environ 12.

a Chaux/Cyanures de métaux alcalins

Les cyanures de métaux alcalins sont formés de l'anion cyanure (CN^-) et de cations métalliques pouvant être du sodium (Na^+) ou du potassium (K^+).

La chaux va apporter des ions calcium qui peuvent modifier l'équilibre de solubilité des cyanures. Aucune valeur de solubilité du cyanure de calcium n'est donnée. La seule information disponible est que cette espèce est soluble. Il n'est donc pas possible de statuer sur les bénéfices d'une telle interaction. Par défaut l'interaction sera notée comme nulle.

b Chaux/Nitrite-Nitrate de métaux alcalins

Les « nitrites-nitrates » de métaux alcalins sont des molécules différentes (Nitrite de métaux alcalins et Nitrate de métaux alcalins) mais de propriétés chimiques proches. Les nitrites sont formés de l'anion nitrite (NO_2^-) et les nitrates de l'anion nitrate (NO_3^-). Ils sont accompagnés de cations métalliques pouvant être du sodium (Na^+) ou du potassium (K^+).

Les réarrangements ioniques en solution aqueuse peuvent donner les molécules suivantes :

	Ca(OH)_2	NaNO_2	KNO_2	NaNO_3	KNO_3	$\text{Ca(NO}_2)_2$	$\text{Ca(NO}_3)_2$
Solubilité en g/l (eau à 20°C)	2	808	3 060	876	316	80	121

Bien que faiblement soluble, la chaux peut faire précipiter partiellement les ions nitrites/nitrates.

L'interaction est positive.

c Chaux/Chlorure de baryum

Le chlorure de baryum (BaCl_2) est un composé chimique composé de l'anion chlorure (Cl^-) et du cation baryum (Ba^{2+}).

Les réarrangements ioniques en solution aqueuse peuvent donner les molécules suivantes :

	Ca(OH)_2	BaCl_2	Ba(OH)_2
Solubilité en g/l (eau à 20°C)	2	358	30

Bien que faiblement soluble, la chaux peut faire précipiter l'ion baryum. L'interaction est positive.

d Chaux/Arséniates métalliques

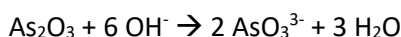
L'arséniate est un composé oxydé de l'arsenic de degré d'oxydation +5 -As(V)-. C'est un anion de formule AsO_4^{3-} . Les réarrangements ioniques en solution aqueuse peuvent donner les molécules suivantes :

	Ca(OH)_2	$\text{M}_x(\text{AsO}_4)_y$ As(V)	$\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$ As(V)
Solubilité en g/l (eau à 20°C)	2	Fonction des métaux	0,13

L'arséniate de calcium est peu soluble, la chaux peut donc faire précipiter en partie les sels d'arséniate solubles. De ce fait, la chaux diminue la mobilité des sels d'arséniate et apporte une interaction positive.

e Chaux/Trioxyde d'arsenic

Le trioxyde d'arsenic (appelé également anhydride arsénieux) est un oxyde d'arsenic de degré d'oxydation +3 – As(III) – En solution aqueuse alcaline (pH basique), cas de la saumure provenant de la mine, il forme de l'arsénite (AsO_3^{3-}) selon la réaction suivante :



Les réarrangements ioniques en solution aqueuse peuvent donner les molécules suivantes :

	Ca(OH)_2	As_2O_3	$\text{Ca (HAsO}_3)$
Solubilité en g/l (eau à 20°C)	2	37	Faiblement soluble

Malheureusement, la valeur de la solubilité de l'arsénite de chaux n'est pas donnée. La seule indication donnée est sa faible solubilité.

Le trioxyde d'arsenic en présence de chaux va probablement précipiter (si la solubilité du trioxyde d'arsenic est supérieure à l'arsénite de calcium) sous forme d'arsénite de calcium. L'interaction sera donc positive en limitant la mobilité de l'arsenic.

f Chaux/Chlorure de mercure

Le chlorure de mercure existe sous 2 formes chimiques, le chlorure mercureux (Hg_2Cl_2) et le chlorure mercurique (HgCl_2). Les deux formes sont composées de l'anion chlorure (Cl^-). Le chlorure mercureux est composé du mercure de degré d'oxydation +1 -Hg(I)- et le chlorure mercurique est composé du mercure de degré d'oxydation +2 – Hg(II).

Les réarrangements ioniques en solution aqueuse peuvent donner les molécules suivantes :

	Ca(OH)_2	Hg_2Cl_2 Hg(I)	HgCl_2 Hg(II)	Hg_2O Hg(I)	HgO Hg(II)
Solubilité en g/l (eau à 20°C)	2	$3,25 \cdot 10^{-4}$	65,7	Instable se transforme en HgO et Hg^0	Insoluble

La chaux va interagir avec le chlorure de mercure (II) pour donner un oxyde de mercure (II) insoluble. La chaux va interagir avec le chlorure de mercure (I), mais de façon limitée compte tenu de la très faible solubilité de ce dernier. L'interaction va apporter de l'oxyde de mercure (II) insoluble et du mercure métal insoluble. L'interaction devrait avoir de ce fait une action positive en diminuant la mobilité du mercure.

g Chaux/sulfate de mercure

Le sulfate de mercure peut être sous 2 formes chimiques, le sulfate mercurieux (Hg_2SO_4) et le sulfate mercurique (HgSO_4). Les deux formes sont composées de l'anion sulfate (SO_4^{2-}). Le sulfate mercurieux est composé du mercure de degré d'oxydation +1 -Hg(I)- et le sulfate mercurique est composé du mercure de degré d'oxydation +2 -Hg(II).

Les réarrangements ioniques en solution aqueuse peuvent donner les molécules suivantes :

	Ca(OH)_2	Hg_2SO_4 Hg(I)	HgSO_4 Hg(II)	Hg_2O Hg(I)	HgO Hg(II)
Solubilité en g/l (eau à 20°C)	2	0,4	Hydrolyse en $\text{HgSO}_4 \cdot 2\text{HgO} + 2 \text{H}_2\text{SO}_4$	Instable se transforme en HgO et Hg^0	Insoluble

La chaux va interagir avec le sulfate de mercurique (I) pour donner de l'oxyde de mercurique (I) qui va se décomposer en oxyde de mercureux (II) insoluble et en mercure métal insoluble.

Le sulfate de mercure (II) s'hydrolyse en un composé mercuriel insoluble.

La chaux devrait donc réduire la mobilité du mercure. Par conséquent, l'interaction est positive.

h Chaux/Chromate et dichromate

Les chromates (CrO_4^{2-}) et bichromates ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$) sont des éléments du chrome de degré d'oxydation +6 -Cr(VI). Le Cr (VI) du point de vue de la santé est un agent CMR(Cancérogène, Mutagène et Reprotoxique) contrairement au Cr (III).

Les chromates (surtout les bichromates) sont des anions oxydants très puissants. Ils peuvent oxyder les molécules pour leur donner une forme plus ou moins soluble.

La chaux est une des formes oxydées du calcium, il n'y aura donc pas d'oxydation de la chaux par le chromate ou dichromate. Seuls les réarrangements ioniques dans la saumure peuvent modifier l'équilibre entre la chaux et les chromates et bichromates.

	Ca(OH)_2	$\text{M}_x(\text{CrO}_4)_y$	$\text{M}_x(\text{Cr}_2\text{O}_7)_y$	$\text{Ca(CrO}_4)$	$\text{Ca(Cr}_2\text{O}_7)$
Solubilité en g/l (eau à 20°C)	2	Plus ou moins soluble en fonction du métal associé	Plus ou moins soluble en fonction du métal associé	22,5	Très soluble

Les données sur la nature des oxydes de chrome étant fragmentaires, il n'est pas possible de se prononcer sur une action positive ou négative. Par défaut, l'interaction est notée comme nulle.

i Chaux/Béryllium

Le béryllium est un métal qui est facilement corrodé en milieu salin saturé d'eau. Le béryllium va se décomposer en cation Be^{2+} . Ce cation pourra interagir avec les anions présents dans la mine. Le béryllium est l'élément le plus léger des alcalino-terreux.

Les réarrangements ioniques en solution aqueuse peuvent donner les molécules suivantes :

	Ca(OH)_2	Be(OH)_2
Solubilité en g/l (eau à 20°C)	2	0,000002

L'hydroxyde de béryllium est insoluble. Les cations béryllium mobiles dans la saumure seront précipités sous forme d'hydroxyde de béryllium. L'interaction est donc positive.

j Chaux/Sels de plomb

Les sels de plomb sont constitués du cation plomb (Pb^{2+}) accolé avec un anion. Dans notre cas, l'anion est non défini. Les chlorures (Cl^-) étant en large excès avec l'apport de saumure, il est considéré que le sel de plomb est une molécule de chlorure de plomb ($PbCl_2$).

Les réarrangements ioniques en solution aqueuse peuvent donner les molécules suivantes :

	$Ca(OH)_2$	$PbCl_2$	$Pb(OH)_2$
Solubilité en g/l (eau à 20°C)	2	10	0,02

La chaux va faire précipiter les sels de plomb sous la forme d'hydroxyde de plomb faiblement soluble. L'interaction est donc positive.

k Chaux/Sels d'arsenic

Les sels d'arsenic sont les molécules contenant de l'As(III) et de l'As(V).

L'interaction avec la chaux correspond à l'addition des interactions déjà évoqué entre la chaux et les arsénates métalliques – As(V) (Chap. 13-d) et le trioxyde d'arsenic – As(III) (Chap. 13-e).

l Chaux/Métaux lourds

Les interactions entre la chaux et les métaux lourds ont été traités à travers ce chapitre 13. Le tableau ci-dessous résume les interactions avec les différents sels étudiés.

	Arsénates métalliques	Trioxyde d'arsenic	Chlorure de mercure	Sulfate de mercure	Chromate et dichromate	Sel de plomb	Sels d'arsenic
Chapitre concerné	13-d	13-e	13-f	13-g	13-h	13-J	13-k
Effet de l'interaction	Positif	Positif	Positif	Positif	Neutre	Positif	Positif

Ce tableau est une représentation de la famille des métaux lourds, il montre que les interactions entre la chaux et les métaux lourds sont globalement positives. De plus la chaux est utilisée dans le traitement des fumées des incinérateurs pour fixer les métaux avant rejet à l'atmosphère.

14 Interaction avec le bicarbonate de sodium

Le bicarbonate de sodium est un composé chimique de formule $NaHCO_3$. Il est constitué d'un anion sodium Na^+ et d'un cation HCO_3^- qui a la particularité d'avoir à la fois un caractère acide et basique. Le bicarbonate de sodium est un composé amphotère.

Caractère acide : $HCO_3^- + OH^- \rightarrow CO_3^{2-} + H_2O$

Caractère alcalin : $HCO_3^- + H_3O^+ \rightarrow CO_2 + 2 H_2O$

La saumure ayant un pH alcalin, le bicarbonate de sodium aura un caractère acide et libèrera des ions carbonates CO_3^{2-} . La dissociation n'étant pas complète, ils seront en concurrence avec les anions hydrogénocarbonate HCO_3^- .

a Bicarbonate de sodium/cyanures de métaux alcalins

Les cyanures de métaux alcalins sont formés de l'anion cyanure (CN^-) et de cations métalliques pouvant être du sodium (Na^+) ou du potassium (K^+). Les réarrangements ioniques en solution aqueuse peuvent donner les molécules suivantes :

	NaHCO_3	KCN	NaCN
Solubilité en g/l (eau à 20°C)	96	500	587

Le pH de la saumure arrivant dans les galeries sera entre pH 11 et 12, et le bicarbonate est amphotère. Dans ces conditions, il aura un caractère acide et formera du carbonate, du sodium et de l'eau. La réaction n'étant pas complète, l'ion hydrogénocarbonate sera toujours présent. Il abaissera légèrement le pH, tout en restant alcalin.

Il n'y aura pas de formation de cyanure d'hydrogène, gaz soluble dans l'eau. Il n'y aura aucune incidence sur le comportement des cyanures.

b Bicarbonate de sodium/nitrites - nitrates de métaux alcalins

Les « nitrites-nitrates » de métaux alcalins sont des molécules différentes (Nitrite de métaux alcalins et Nitrate de métaux alcalins) mais de propriétés chimiques proches. Les nitrites sont formés de l'anion nitrite (NO_2^-) et les nitrates de l'anion nitrate (NO_3^-). Ils sont accompagnés de cations métalliques pouvant être du sodium (Na^+) ou du potassium (K^+). Les réarrangements ioniques en solution aqueuse peuvent donner les molécules suivantes :

	NaHCO_3	NaNO_2	KNO_2	NaNO_3	KNO_3
Solubilité en g/l (eau à 20°C)	96	808	3 060	876	316

Le pH de la saumure arrivant dans les galeries sera entre pH 11 et 12, et le bicarbonate est amphotère. Dans ces conditions, il aura un caractère acide et formera du carbonate, du sodium et de l'eau. La réaction n'étant pas complète, l'ion hydrogénocarbonate sera toujours présent. Il abaissera légèrement le pH, tout en restant alcalin.

Il n'y aura aucune incidence sur le comportement des sels de nitrate et nitrite.

c Bicarbonate de sodium/chlorure de baryum

Le chlorure de baryum (BaCl_2) est un composé chimique composé de l'anion chlorure (Cl^-) et du cation baryum (Ba^{2+}).

Les réarrangements ioniques en solution aqueuse peuvent donner les molécules suivantes :

	NaHCO_3	BaCl_2	$\text{Ba}(\text{CO}_3)_2$	$\text{Ba}(\text{HCO}_3)_2$
Solubilité en g/l (eau à 20°C)	96	358	0,01	Pas de donnée, mais probablement soluble

Le pH de la saumure arrivant dans les galeries sera entre pH 11 et 12 et le bicarbonate est amphotère. Dans ces conditions, il aura un caractère acide et formera du carbonate, du sodium et de l'eau. La réaction n'étant pas complète, l'ion hydrogénocarbonate sera toujours présent. Il abaissera légèrement le pH, tout en restant alcalin.

Le carbonate généré avec la solution alcaline peut se combiner avec le cation du baryum pour former un carbonate de baryum insoluble. De ce fait, la mobilité du baryum va diminuer. L'interaction est donc positive.

d Bicarbonate de sodium/arséniates

L'arséniate est un composé oxydé de l'arsenic de degré d'oxydation +5 -As(V)-. C'est un anion de formule AsO_4^{3-} . Les réarrangements ioniques en solution aqueuse peuvent donner les molécules suivantes :

	NaHCO_3	$\text{K}_3(\text{AsO}_4)$ As(V)	$\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$ As(V)	$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$	CaCO_3
Solubilité en g/l (eau à 20°C)	96	190	0,13	16,6	$6,17 \cdot 10^{-3}$

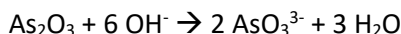
Le pH de la saumure arrivant dans les galeries sera entre pH 11 et 12, et le bicarbonate est amphotère. Dans ces conditions, il aura un caractère acide et formera du carbonate, du sodium et de l'eau. La réaction n'étant pas complète, l'ion hydrogénocarbonate sera toujours présent. Il abaissera légèrement le pH, tout en restant alcalin.

Le bicarbonate de sodium peut apporter un déséquilibre dans la solubilité des éléments en apportant du carbonate et de l'hydrogénocarbonate. Ces deux anions pourraient déséquilibrer la solubilité de l'arséniate de calcium. Le carbonate et l'hydrogénocarbonate pourrait s'accoupler au calcium provenant de l'arséniate de calcium et ainsi libérer l'anion arséniate.

L'interaction pourrait rendre l'arsenic plus mobile.

e Bicarbonate de sodium/trioxyde d'arsenic

Le trioxyde d'arsenic (appelé également anhydride arsénieux) est un oxyde d'arsenic de degré d'oxydation +3 – As(III) – En solution aqueuse alcaline (pH basique), cas de la saumure provenant de la mine, il forme de l'arsénite (AsO_3^{3-}) selon la réaction suivante :



Les réarrangements ioniques en solution aqueuse peuvent donner les molécules suivantes :

	NaHCO_3	As_2O_3 As(III)
Solubilité en g/l (eau à 20°C)	96	37

Le trioxyde d'arsenic en solution donne un cation d'arsénite qui ne pourra pas se coupler au sodium du bicarbonate de sodium, anion déjà présent en grande quantité dans la saumure. Il n'y aura aucune interaction avec le trioxyde d'arsenic.

Il n'y aura probablement aucune interaction entre le bicarbonate de sodium et le trioxyde d'arsenic.

f Bicarbonate de sodium/chlorures de mercure

Le chlorure de mercure existe sous 2 formes chimiques, le chlorure mercurieux (Hg_2Cl_2) et le chlorure mercurique (HgCl_2). Les deux formes sont composées de l'anion chlorure (Cl^-). Le chlorure mercurieux est composé du mercure de degré d'oxydation +1 -Hg(I)- et le chlorure mercurique est composé du mercure de degré d'oxydation +2 -Hg(II).

Les réarrangements ioniques en solution aqueuse peuvent donner les molécules suivantes :

	NaHCO_3	Hg_2Cl_2 Hg(I)	HgCl_2 Hg(II)	Hg_2CO_3 Hg(I)	$\text{Hg}_2(\text{HCO}_3)_2$ Hg(I)	HgCO_3 Hg(II)	$\text{Hg}(\text{HCO}_3)_2$ Hg(II)
Solubilité en g/l (eau à 20°C)	96	$3,25 \cdot 10^{-4}$	65,7	$4,35 \cdot 10^{-6}$	Pas de donnée	Insoluble	Pas de donnée

Le pH de la saumure arrivant dans les galeries sera entre pH 11 et 12, et le bicarbonate est amphotère. Dans ces conditions, il aura un caractère acide et formera du carbonate, du sodium et de l'eau. La réaction n'étant pas complète, l'ion hydrogénocarbonate sera toujours présent. Il abaissera légèrement le pH, tout en restant alcalin.

Le sel de mercure (II) disponible dans la saumure peut précipiter sous forme de carbonate.

g Bicarbonate de sodium/sulfates de mercure

Le sulfate de mercure peut être sous 2 formes chimiques, le sulfate mercurieux (Hg_2SO_4) et le sulfate mercurique (HgSO_4). Les deux formes sont composées de l'anion sulfate (SO_4^{2-}). Le sulfate mercurieux est composé du mercure de degré d'oxydation +1 -Hg(I)- et le sulfate mercurique est composé du mercure de degré d'oxydation +2 -Hg(II).

Les réarrangements ioniques en solution aqueuse peuvent donner les molécules suivantes :

	NaHCO_3	Hg_2SO_4 Hg(I)	HgSO_4 Hg(II)	Hg_2CO_3 Hg(I)	$\text{Hg}_2(\text{HCO}_3)_2$ Hg(I)
Solubilité en g/l (eau à 20°C)	96	0,4	Hydrolyse en $\text{HgSO}_4 \cdot 2\text{HgO}$ + $2 \text{H}_2\text{SO}_4$	$4,35 \cdot 10^{-6}$	Absence de donnée

Le pH de la saumure arrivant dans les galeries sera entre pH 11 et 12, et le bicarbonate est amphotère. Dans ces conditions, il aura un caractère acide et formera du carbonate, du sodium et de l'eau. La réaction n'étant pas complète, l'ion hydrogénocarbonate sera toujours présent. Il abaissera légèrement le pH, tout en restant alcalin.

Le mercure, comme la majorité des cations métalliques excepté le sodium et potassium, est insoluble. Le sel de mercurieux - Hg(I) - disponible dans la saumure peut précipiter sous forme de carbonate.

L'interaction est donc positive.

h Bicarbonate de sodium/Chromate – Bichromate

Les chromates (CrO_4^{2-}) et bichromates ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$) sont des éléments du chrome de degré d'oxydation +6 – Cr(VI). Le Cr (VI) du point de vue de la santé est un agent CMR (Cancérogène, Mutagène et Reprotoxique) contrairement au Cr (III).

Les chromates (surtout les bichromates) sont des anions oxydants très puissants. Ils peuvent oxyder les molécules pour leur donner une forme plus ou moins soluble.

Le bicarbonate n'est pas un réducteur, il ne sera pas réduit par les chromate ou bichromate.

Les chromates et bichromates n'oxyderont pas le bicarbonate de sodium. Il n'y aura donc aucune interaction

i Bicarbonate de sodium/Béryllium

Le béryllium est un métal qui est facilement corrodé en milieu salin saturé d'eau. Le béryllium va se décomposer en cation Be^{2+} . Ce cation pourra interagir avec les anions présents dans la mine. Le béryllium est l'élément le plus léger des alcalino-terreux.

Les réarrangements ioniques en solution aqueuse peuvent donner les molécules suivantes :

	NaHCO_3	BeCl_2	BeCO_3	$\text{Be}(\text{HCO}_3)_2$
Solubilité en g/l (eau à 20°C)	96	420	2,18	Absence de donnée

Le chlorure de béryllium présent dans la saumure est soluble, le béryllium va s'accoupler avec le carbonate peu soluble et l'hydrogénocarbonate dont il n'existe pas de donnée. Cependant le béryllium fait partie de la famille des alcalino-terreux dans le tableau périodique des éléments dit tableau de Mendeleïev. Cette famille d'éléments a des propriétés chimiques semblables. L'hydrogénocarbonate de béryllium aura le même ordre de grandeur de solubilité que l'hydrogénocarbonate de magnésium (0,8 g/l) ou que l'hydrogénocarbonate de calcium (16,6 g/l). A la vue de ces solubilités, l'hydrogénocarbonate de béryllium doit être faiblement soluble.

L'interaction entre le béryllium et le carbonate de sodium sera donc positive car les 2 sels formés sont moins solubles que le chlorure de béryllium initial.

j Bicarbonate de sodium/Sel de plomb

Les sels de plomb sont constitués du cation plomb (Pb^{2+}) accolé avec un anion. Dans notre cas, l'anion est non définit. Les chlorures (Cl^-) étant en large excès avec l'apport de saumure, il est considéré que le sel de plomb est une molécule de chlorure de plomb (PbCl_2).

Les réarrangements ioniques en solution aqueuse peuvent donner les molécules suivantes :

	NaHCO_3	PbCl_2	PbCO_3	$\text{Pb}(\text{HCO}_3)_2$
Solubilité en g/l (eau à 20°C)	9,6	10	$7,27 \cdot 10^{-4}$	Donnée non disponible

Le pH de la saumure arrivant dans les galeries sera entre pH 11 et 12, et le bicarbonate est amphotère. Dans ces conditions, il aura un caractère acide et formera du carbonate, du sodium et de l'eau. La réaction n'étant pas complète, l'ion hydrogénocarbonate sera toujours présent. Il abaissera légèrement le pH, tout en restant alcalin.

L'apport de carbonate peut faire précipiter le plomb, ce qui rendra le plomb moins mobile. L'interaction sera donc positive.

k Bicarbonate de sodium/sel d'arsenic

Les sels d'arsenic sont les molécules contenant de l'As(III) et de l'As(V).

L'interaction avec le bicarbonate de sodium correspond à l'addition des interactions déjà évoquées entre le bicarbonate de sodium et les arsénates métalliques – As(V) (Chap. 14-d) et le trioxyde d'arsenic – As(III) (Chap. 14-e).

l Bicarbonate de sodium/métaux lourds

Les interactions entre le bicarbonate de sodium et les métaux lourds ont été traités à travers ce chapitre 14. Le tableau ci-dessous résume les interactions avec les différents sels étudiés.

	Arsénates métalliques	Trioxyde d'arsenic	Chlorure de mercure	Sulfate de mercure	Chromate et dichromate	Sel de plomb	Sels d'arsenic
Chapitre concerné	14-d	14-e	14-f	14-g	14-h	14-J	14-k
Effet de l'interaction	Négatif	Négatif	Positif	Positif	Neutre	Positif	Négatif

Ce tableau est une représentation de la famille des métaux lourds. Les interactions avec la famille des composés d'arsenic sont négatives, avec celle du chrome, elles sont neutres. Par contre elles sont positives avec les sels de plomb et les sels de mercure. Le bicarbonate de sodium est un réactif pour le traitement des fumées des incinérateurs, ce traitement est utilisé pour abattre les métaux avant rejet à l'atmosphère. Les interactions avec les métaux lourds sont jugées de ce fait positives.

15 Interaction avec les métaux lourds

Les métaux lourds sont généralement définis comme des éléments métalliques naturels dont la masse volumique est supérieure à 5000kg/m³. Les métaux lourds présents dans les déchets sont considérés comme corrodé donc sous forme de cation et partiellement soluble.

Les métaux lourds sont les suivants :

- Antimoine
- Arsenic
- Cadmium
- Chrome
- Cuivre
- Plomb
- Mercure
- Nickel
- Sélénium
- Tellure
- Thallium
- Etain

a Métaux lourds/cyanures de métaux alcalins

Les cyanures de métaux alcalins sont formés de l'anion cyanure (CN⁻) et de cations métalliques pouvant être du sodium (Na⁺) ou du potassium (K⁺). Les réarrangements ioniques en solution aqueuse peuvent donner les molécules suivantes :

Métaux	Cyanure de métaux lourds	Solubilité dans l'eau à 20°C en g/l
Potassium	KCN	500
Sodium	NaCN	587
Cadmium	Cd(CN) ₂	0,22
Cuivre	CuCN	1,60.10 ⁻⁸
Mercure	Hg ₂ (CN) ₂	2,27.10 ⁻¹¹
	Hg(CN) ₂	93
Thallium	TlCN	168

Ces quelques exemples de solubilité de cyanure métallique montrent que la solubilité des cyanures de potassium et sodium est beaucoup plus importante que celle des métaux lourds (Cadmium, Cuivre, Mercure, Thallium). Les métaux lourds peuvent également s'arranger avec le fer (pouvant provenir des fûts par exemple) et le cyanure pour former des ferrocyanures métalliques (M_x(FeCN)_y) insolubles. Les métaux lourds dissouts peuvent rendre le cyanure et eux-mêmes moins mobiles en précipitant. L'interaction serait donc positive.

b Métaux lourds/Nitrites-nitrates de métaux alcalins

Les « nitrites-nitrates » de métaux alcalins sont des molécules différentes (Nitrite de métaux alcalins et Nitrate de métaux alcalins) mais de propriétés chimiques proches. Les nitrites sont formés de l'anion nitrite (NO₂⁻) et les nitrates de l'anion nitrate (NO₃⁻). Ils sont accompagnés de cations métalliques pouvant être du sodium (Na⁺) ou du potassium (K⁺). Les réarrangements ioniques en solution aqueuse peuvent donner les molécules suivantes :

Métaux	Nitrate métallique	Solubilité en g/l (eau à 20°C)
Sodium	NaNO ₃	876
Potassium	KNO ₃	316
Cadmium	Cd(NO ₃) ₂	1 360
Chrome	Cr(NO ₃) ₃	1 300
Cuivre	Cu(NO ₃) ₂	1 250
Plomb	Pb(NO ₃) ₂	543
Nickel	Ni(NO ₃) ₂	942
Thallium	TlNO ₃	95,5

Aucune valeur n'a été trouvée concernant la solubilité des nitrites associés à des métaux lourds. Les nitrites étant assez proches chimiquement des nitrates, il est supposé que la solubilité de leur sel soit du même ordre de grandeur. Ces sels sont généralement solubles voire très solubles. Il y aura probablement peu d'interaction entre les sels solubles, l'équilibre de solubilité sera faiblement modifié. L'interaction est jugée nulle.

c Métaux lourds/Chlorure de Baryum

Le chlorure de baryum (BaCl_2) est un composé chimique composé de l'anion chlorure (Cl^-) et du cation baryum (Ba^{2+}).

Les réarrangements ioniques en solution aqueuse peuvent donner les molécules suivantes :

Métaux	Chlorure métallique	Solubilité en g/l (eau à 20°C)
Baryum	BaCl_2	358
Antimoine	SbCl_3	9 100
Cadmium	CdCl_2	1 350
Cuivre	CuCl_2	730
Plomb	PbCl_2	10
Mercure	Hg_2Cl_2	$3,25 \cdot 10^{-4}$
	HgCl_2	65,7
Nickel	NiCl_2	668
Etain	SnCl_2	900

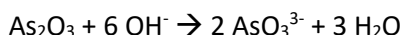
Il n'existe pas de règle générale sur la solubilité des chlorures de métaux lourds. L'interaction sera notée par défaut nulle.

d Métaux lourds/Arséniates métalliques

L'arséniate est un composé oxydé de l'arsenic de degré d'oxydation +5 -As(V)-. C'est un anion de formule AsO_4^{3-} . Etant donné l'impossibilité de statuer sur l'interaction entre les arséniates métalliques (comprenant les arséniates de métaux lourds) et les arséniates de métaux lourds, l'interaction est évaluée comme nulle.

e Métaux lourds/trioxyde d'arsenic

Le trioxyde d'arsenic (appelé également anhydride arsénieux) est un oxyde d'arsenic de degré d'oxydation +3 – As(III) – En solution aqueuse alcaline (pH basique), cas de la saumure provenant de la mine, il forme de l'arsénite (AsO_3^{3-}) selon la réaction suivante :



Le trioxyde d'arsenic est un acide faible, il est facilement soluble dans la soude. Il forme l'anion arsénite. Aucune interaction n'a été trouvée entre les métaux lourds et le trioxyde d'arsenic. Par défaut l'interaction sera évaluée comme nulle.

f Métaux lourds/Chlorure de mercure

Le chlorure de mercure existe sous 2 formes chimiques, le chlorure mercureux (Hg_2Cl_2) et le chlorure mercurique (HgCl_2). Les deux formes sont composées de l'anion chlorure (Cl^-). Le chlorure mercureux est composé du mercure de degré d'oxydation +1 -Hg(I)- et le chlorure mercurique est composé du mercure de degré d'oxydation +2 – Hg(II).

Le mercure faisant partie de la famille des métaux lourds, il n'y a aucune interaction entre le chlorure de mercure et les métaux lourds.

g Métaux lourds/Sulfate de mercure

Le sulfate de mercure peut être sous 2 formes chimiques, le sulfate mercurieux (Hg_2SO_4) et le sulfate mercurique (HgSO_4). Les deux formes sont composées de l'anion sulfate (SO_4^{2-}). Le sulfate mercurieux est composé du mercure de degré d'oxydation +1 -Hg(I)- et le sulfate mercurique est composé du mercure de degré d'oxydation +2 -Hg(II).

Le mercure faisant partie de la famille des métaux lourds, il n'y a aucune interaction entre le sulfate de mercure et les métaux lourds.

h Métaux lourds/Chromates et bichromates

Les chromates sont associés à un cation métallique. Sans précision du cation métallique avec lequel ils sont associés, il n'est pas possible de se prononcer sur l'interaction entre ces chromates/bichromates et les métaux lourds. De ce fait, l'interaction est notée nulle.

i Métaux lourds/Béryllium

Le béryllium est un métal qui est facilement corrodé en milieu salin saturé d'eau. Le béryllium va se décomposer en cation Be^{2+} . Ce cation pourra interagir avec les anions présents dans la mine. Le béryllium est l'élément le plus léger des alcalino-terreux.

Les métaux lourds en solution sont des cations, donc chargés positivement. Le béryllium sera en solution dans la saumure sous la forme de cation également, Be^{2+} . Les cations se repoussant, il n'y a pas de possibilité d'interaction entre les métaux lourds et d'autres métaux comme le béryllium.

j Métaux lourds/Sel de plomb

Les sels de plomb sont constitués du cation plomb (Pb^{2+}) accolé avec un anion. Dans notre cas, l'anion est non définit. Les chlorures (Cl^-) étant en large excès avec l'apport de saumure, il est considéré que le sel de plomb est une molécule de chlorure de plomb (PbCl_2).

Le plomb faisant partie de la famille des métaux lourds, il n'y a aucune interaction entre les sels de plomb et les métaux lourds.

k Métaux lourds/Sel d'arsenic

Les sels d'arsenic sont les molécules contenant de l'As(III) et de l'As(V).

L'interaction avec les métaux lourds correspond à l'addition des interactions déjà évoquées entre les métaux lourds et les arséniate métalliques - As(V) (Chap. 15-d) et le trioxyde d'arsenic - As(III) (Chap. 15-e).

Annexe II : Répartition des masses élémentaires par catégorie de déchet et par bloc

Somme de Q_Mercure												
Étiquettes	colonnes											
Étiquettes de lignes	B11	B12	B13	B14	B15	B21	B22	B23	B24	B25	(vide)	Total général
A1 - Sels de trempe	0,00172567	0,00150053	0,00094729	0,00103407	0,00029057				0,00024997			0,0057481
A2 - Sels de trempe non cyanurés	0,00548616	0,00012254	0,0001746	8,2535E-05	3,5775E-06				3,6549E-05			0,00590596
B10-Produits phytosanitaires		0				0					0	0
B3 - Déchets arseniés	0,00055032	0,06664979	0,01494552	7,2129E-05	2,7278E-06	0,03895945	0,03809702	0,01941337		0		0,17869033
B5 - Déchets mercuriels	0,00157668		0,44004601	0,3144645		0			0,00422157	0,00067738		0,76098614
B6 - Terres polluées	0,00221799	0,00100484	0,00197983	0,00140367	0	0,0007668	8,1639E-05	0,00168205	0,00211038	0,00012019		0,01136739
C4 - Déchets chromiques	0,00022209	0,00039895	0,00356603	2,1131E-05		0			2,102E-05	0,00011081		0,00434002
C8 - Déchets de galvanisation	0,00024275	0,00013943	0,00034671	0,00151062	1,8649E-05	0,00014934			0,00390684			0,00631434
D12 - Déchets de laboratoire	5,3413E-06	0,06288995	0,02495124	0,04789072					0,02418125	0,02897922		0,18889772
D7 - Résidus de l'industrie	0	0	0	0	0					0		0
E9 - Résidus d'incinération	0,01313877	0,01387282	0,01951643	0,01093681	0,00452425	0,01088176	0,02050049	0,01558336	0,01273757	0,00425855		0,1259508
(vide)												
Total général	0,02516577	0,14657883	0,50647364	0,37741618	0,00483977	0,05075735	0,05867915	0,03667878	0,04746516	0,03414615		1,2882008

Somme de Q_Chrome												
Étiquettes	colonnes											
Étiquettes de lignes	B11	B12	B13	B14	B15	B21	B22	B23	B24	B25	(vide)	Total général
A1 - Sels de trempe	0,40331507	0,27722131	0,18320937	0,37924625	0,04291287				0,12480316			1,41070804
A2 - Sels de trempe non cyanurés	0,40514083	0,14140139	0,16743917	0,09069461	0,0009108				0,01378509			0,81937189
B10-Produits phytosanitaires		0				0					0	0
B3 - Déchets arseniés	0,05596513	0,15408351	0,41986437	0,01265588	0,00047863	1,81475608	0,42367573	0,28836391		0		3,16984324
B5 - Déchets mercuriels	3,0749E-05		0,00194267	0,00098837		0			0,00061968	0,00041206		0,00399353
B6 - Terres polluées	2,16417347	0,14148134	2,3547708	1,82807083	0,03123668	0,14459908	0,19476321	0,13581925	2,59609367	0,05404586		9,64505418
C4 - Déchets chromiques	0,99111493	0,53321105	6,46953042	0,48073116		0,01679692			0,47820682	0,0146486		8,98423992
C8 - Déchets de galvanisation	0,45725557	0,67089239	0,17558461	0,83461838	0,41786752	0,01288244			0,11579241			2,68489331
D12 - Déchets de laboratoire	0,00042734	0,00349525	0,00138672	0,00266164					0,00134393	0,00161059		0,01092546
D7 - Résidus de l'industrie	0	0	0	0	0					0		0
E9 - Résidus d'incinération	0,56495763	0,37621398	0,3351446	0,28088664	0,15958572	0,48932221	0,68165993	0,37638749	0,3334523	0,15782029		3,75543078
(vide)												
Total général	5,04238073	2,29800023	10,1088727	3,91055375	0,65299221	2,47835672	1,30009886	0,80057066	3,66409705	0,2285374		30,4844604

Somme de Q_Cadmium												
Étiquettes	colonnes											
Étiquettes de lignes	B11	B12	B13	B14	B15	B21	B22	B23	B24	B25	(vide)	Total général
A1 - Sels de trempe	0,16840233	0,07093187	0,13765871	0,32811105	0,01568411				0,02147204			0,74226012
A2 - Sels de trempe non cyanurés	0,0014125	0,00539621	0,00538831	8,8902E-05	0				0,00018697			0,01247289
B10-Produits phytosanitaires		0				0					0	0
B3 - Déchets arseniés	0,00985908	2,30600895	0,02828174	0,00569738	0,00040468	0,85974023	14,6869336	0,12286136	0,0029537			18,0227408
B5 - Déchets mercuriels	2,2244E-06		0,0164293	0,01559931		0			0,00184613	0		0,03387696
B6 - Terres polluées	0,12838298	0,02564697	0,0032845	0,00583858	11,9369847	0,06137915	0,00367197	0,02559865	0,00152952	0,01183579		12,2041528
C4 - Déchets chromiques	0,00059783	0,00156062	0,00411274	0,00123485		0			0,00122836	0		0,00873439
C8 - Déchets de galvanisation	0,03755214	0,03706066	0,01695581	0,00528345	0,0001191	0,00363973			0,00010992			0,10072081
D12 - Déchets de laboratoire	6,1427E-06	0,01981464	0,00786135	0,01508886					0,00761875	0,00913044		0,05952018
D7 - Résidus de l'industrie	0	0	0	0	0					0		0
E9 - Résidus d'incinération	0,14680441	0,18047551	0,20357023	0,12103955	0,05806559	0,10086507	0,22666452	0,20596242	0,16815736	0,05457698		1,46618161
(vide)												
Total général	0,49301964	2,64689542	0,42354268	0,49798193	12,0112582	1,02562418	14,9172701	0,35442242	0,20510274	0,07554321		32,6506606

Somme de Q_Arsenic												
Étiquettes	colonnes											
Étiquettes de lignes	B11	B12	B13	B14	B15	B21	B22	B23	B24	B25	(vide)	Total général
A1 - Sels de trempe	0,02166065	0,01387156	0,06020354	0,09624636	0,0190537				0,02154169			0,2325775
A2 - Sels de trempe non cyanurés	0,03946047	0,00271398	0,02992148	0,01399728	0,00096714				0,032138			0,11919835
B10-Produits phytosanitaires		0,60773999				0,79799999					0,15225	1,55798998
B3 - Déchets arseniés	9,59621511	241,18138	26,2039843	10,4483593	0,67661699	127,311327	1202,31759	90,1394932	4,5156048			1712,39057
B5 - Déchets mercuriels	2,1589E-05		0,00535287	0,00878229		0			0,00153629	0,0001809		0,01587393
B6 - Terres polluées	1,0387407	2,20305803	0,05395292	0,01228104	0,00384172	0,5731416	0,02079069	0,19660689	0,21649634	1,08485296		5,40376288
C4 - Déchets chromiques	0,00218936	0,00172354	0,0317781	0,02020656		0,00033182			0,02010045	0,00047027		0,07680009
C8 - Déchets de galvanisation	0,01167121	0,00230998	0,00728916	0,0092052	0,00249362	0,00058897			0,00277196			0,03633012
D12 - Déchets de laboratoire	9,8638E-05	0,36552473	0,14501993	0,27834722					0,14054465	0,16843111		1,09796627
D7 - Résidus de l'industrie	0,00012989	7,645E-05	7,05E-05	0	9,2408E-07					0		0,00027776
E9 - Résidus d'incinération	0,06690972	0,05804297	0,07571898	0,07631431	0,03377093	0,06179279	0,09016886	0,06292521	0,06910283	0,01872173		0,61346833
(vide)												
Total général	10,7770973	244,436441	26,6132918	10,9637396	0,73674504	128,745182	1202,42855	90,3990253	5,01983701	1,42490697		1721,54481

Annexe III : Recherche des masses élémentaires prépondérantes – Identification des CAP

Déstockage du Mercure (Hg)

Classe déchets	Scénario S4	CAP	Nombre colis	Tonnes d'éléments	Total Tonnes
B5 -Déchets mercuriels	Base	329	9	0	0,7610
	Base	10503	3	0,73921536	
	Base	11115	28	0,007121198	
	Base	11206	60	0,012395518	
	Base	981016	78	0,00067738	
	Base	990813	1	0,001576682	
D12-Déchets de laboratoire	Exclu	110	30	non analysé	
	Base	10606	62	0,188892377	0,1889
	Exclu	121	31	4,16118E-06	0,0000
	Exclu	990211	79	non analysé	
	Exclu	20218	15	1,18016E-06	
	B3 -Déchets arseniés	Base	CAP déstockage Cd - 811	2540	0,014367148
Base		CAP déstockage Cd - 812	99	0,00048128	
Base		CAP déstockage Cd - 813	20	2,82278E-05	
Base		CAP déstockage Cd - 814	32	4,23214E-05	
Base		CAP déstockage Cd - 815	38	6,44563E-05	
Base		CAP déstockage Cd - 1009	880	0,078889024	
Base		CAP déstockage Cd - 10818	1859	0,015697855	
Base		CAP déstockage Cr - 111	23	8,23227E-05	0,0049
B3 -Déchets arseniés	Base	CAP déstockage Cr - 509	28	0	
	Base	CAP déstockage Cr - 10827	47	7,78199E-05	
	Base	CAP déstockage Cr - 11022	15	0,002996435	
	Base	CAP déstockage Cr - 11203	6	0,001746792	
	B3 -Déchets arseniés	Base	1026	22	0,017874913
Base		10127	71	0,030517071	
Base		10211	310	0,001537614	
Base		10740	41	0,007973789	
Base		10915	19	0,005237713	

Déstockage du Chrome (Cr)

Classe déchets	Scénario S4	CAP	Nombre colis	Tonnes d'éléments	Total Tonnes	
C4 -Déchets chromiques	Base	206	19	0,257045769	8,9842	
	Base	832	24	0,012412727		
	Base	902	38	0,03112084		
	Base	10114	14	0,999004845		
	Base	10115	20	0,233959713		
	Base	10912	16	0,015356057		
	Base	20120	14	0,478206817		
	Base	20121	35	1,077720284		
	Base	981005	25	0,498747901		
	Base	981020	47	2,1915036		
	Base	990207	3	0,261745626		
	Base	990612	3	0,115985523		
	Base	990906	4	0,372046911		
	Base	990913	40	0,046659182		
	Base	991008	23	1,437638527		
	Base	991101	33	0,955085596		
	B6 - Terres polluées	Base	511	147	0,182406475	9,0910
		Base	516	13	1,563276936	
		Base	822	30	0,090481004	
		Base	914	196	0,166929838	
Base		1221	30	0,123644112		
Base		11027	36	0,211769237		
Base		11204	39	3,92228297		
Base		20112	15	2,472297196		
Base		990915	296	0,357863613		
C8 -Déchets de galvanisation		Base	108	124	0,852357408	2,2359
	Base	10112	81	0,10935646		
	Base	11009	34	0,845500386		
	Base	20118	29	0,049545713		
	Base	20119	10	0,044313751		
	Base	990102	193	0,334803982		
	Exclu	212	8	0,003741007	0,0311	
	Exclu	919	5	0,004642837		
	Exclu	10113	11	0,005459622		
	Exclu	10822	3	0,001981507		
	Exclu	11106	20	0,009069532		
	Exclu	990101	12	0,004236145		
	Exclu	990410	18	0,002017537		
	B3 -Déchets arseniés	Base	CAP déstockage Cd - 811	2540	0,282958058	0,4454
		Base	CAP déstockage Cd - 812	99	0,031921612	
Base		CAP déstockage Cd - 813	20	0,04326717		
Base		CAP déstockage Cd - 814	32	0,064869664		
Base		CAP déstockage Cd - 815	38	0,022364397		
Base		CAP déstockage Cd - 1009	880	0		
Base		CAP déstockage Cd - 10818	1859	0		
B3 -Déchets arseniés	Base	CAP déstockage Hg - 1026	22	0	0,0254	
	Base	CAP déstockage Hg - 10127	71	0		
	Base	CAP déstockage Hg - 10211	310	0,025351747		
	Base	CAP déstockage Hg - 10740	41	0		
	Base	CAP déstockage Hg - 10915	19	0		
B3 -Déchets arseniés	Base	111	23	0,258728624	2,6645	
	Base	509	28	1,690931996		
	Base	10827	47	0,246393741		
	Base	11022	15	0,295959373		
	Base	11203	6	0,172531515		
	B6 -Terres polluées	Exclu	5	20	0,017926225	0,4772
Exclu		217	5	0,00011489		
Exclu		313	96	0		
Exclu		319	14	0,000484389		
Exclu		402	19	0,0048748		
Exclu		403	21	0,01287238		
Exclu		611	2	0,000132948		
Exclu		613	12	0,004826402		
Exclu		619	14	0,067563485		
Exclu		710	29	0,054275013		
Exclu		805	9	0,000179742		
Exclu		901	13	0,013196567		
Exclu		903	7	0,003930083		
Exclu		925	17	0,023105231		
Exclu		1010	15	0,010707454		
Exclu		1014	3	0		
Exclu		1124	70	0,018334125		
Exclu		1221	67	0,005308639		
Exclu		10120	40	0,004371227		
Exclu		10202	18	0,006486899		
Exclu		10203	34	0		
Exclu		10215	11	0		
Exclu		10230	7	0,000317157		
Exclu		10309	3	0		
Exclu		10315	11	0,000936564		
Exclu		10502	18	0		
Exclu		10525	2	0,000426888		
Exclu		10607	1	0		
Exclu		10621	6	0		
Exclu		10623	23	0,001443815		
Exclu		10701	20	0,000196129		
Exclu		10824	32	0,021033253		
Exclu		10903	428	0,024826345		
Exclu		10904	42	0		
Exclu		10911	14	0,003617389		
Exclu		10913	78	0,007711558		
Exclu		10914	11	0		
Exclu		11015	6	0,003727165		
Exclu		11108	5	0,000119466		
Exclu		11123	14	0,001049615		
Exclu		11128	14	0,002426312		
Exclu		11215	2	0,000165882		
Exclu		20124	3	0,000578286		
Exclu		20131	60	0		
Exclu		20304	25	0,007586167		
Exclu	20305	11	0,017937737			
Exclu	20314	13	0,004710164			
Exclu	20402	20	0			
Exclu	20403	9	0,000530533			
Exclu	20425	2	0			
Exclu	20531	157	0,000766041			
Exclu	20601	20	0			
Exclu	20612	8	0,000241974			
Exclu	20613	315	0,04759788			
Exclu	20713	81	0,007016331			
Exclu	20806	4	0			
Exclu	981108	62	0,003919589			
Exclu	990212	804	0,066523735			
Exclu	990406	8	0,001521892			
Exclu	990806	11	0,001966131			

Déstockage du Cadmium (Cd)

Classe déchets	Scénario S4	CAP	Nombre colis	Tonnes d'éléments	Total Tonnes
B3 -Déchets arseniés	Base	811	2540	16,25843041	17,951
	Base	812	99	0,063024722	
	Base	813	20	0,028921905	
	Base	814	32	0,043362075	
	Base	815	38	0,051760396	
	Base	1009	880	1,366657201	
B3 -Déchets arseniés	Base	10818	1859	0,139052471	
	Base	CAP déstockage Cr - 111	23	2,81011E-05	0,0013
	Base	CAP déstockage Cr - 509	28	0,000271132	
	Base	CAP déstockage Cr - 10827	47	0	
	Base	CAP déstockage Cr - 11022	15	0,000632444	
	Base	CAP déstockage Cr - 11203	6	0,000368688	
B3 -Déchets arseniés	Base	CAP déstockage Hg - 1026	22	0,006101969	0,034
	Base	CAP déstockage Hg - 10127	71	0	
	Base	CAP déstockage Hg - 10211	310	0,024954513	
	Base	CAP déstockage Hg - 10740	41	0,001804878	
C8 -Déchets de galvanisation	Base	CAP déstockage Hg - 10915	19	0,001185564	
	Base	CAP déstockage Cr - 108	124	0,04428112	0,0934
	Base	CAP déstockage Cr - 10112	81	0,003439588	
	Base	CAP déstockage Cr - 11009	34	0,000174104	
	Base	CAP déstockage Cr - 20118	29	0,000134186	
	Base	CAP déstockage Cr - 20119	10	0	
	Base	CAP déstockage Cr - 990102	193	0,045351254	
	Exclu	212	8	0	0,0072
	Exclu	919	5	0,002136378	
	Exclu	10113	11	0	
Exclu	10822	3	0,000911781		
Exclu	11106	20	0,004173299		
Exclu	990101	12	0		
Exclu	990410	18	0		

Déstockage de l'Arsenic (As)

Classe déchets	Scénario S4	CAP	Nombre colis	Tonnes d'éléments	Total Tonnes	
B6 -Terres polluées	Base	CAP déstockage Cr - 511	147	0,020690884	4,0074	
	Base	CAP déstockage Cr - 516	13	0,00116499		
	Base	CAP déstockage Cr - 822	30	0,000450003		
	Base	CAP déstockage Cr - 914	196	0,062372234		
	Base	CAP déstockage Cr - 1221	30	3,701447952		
	Base	CAP déstockage Cr - 11027	36	0,002681575		
	Base	CAP déstockage Cr - 11204	39	0,002922975		
	Base	CAP déstockage Cr - 20112	15	0,001842413		
	Base	CAP déstockage Cr - 990915	296	0,213848966		
B6 -Terres polluées	Base	10318	93	0,14859383	1,1779	
	Base	991114	673	1,029284574		
B3 -Déchets arseniés	Base	CAP déstockage Cr - 111	23	0,002438734	3,6400	
	Base	CAP déstockage Cr - 509	28	0,019436		
	Base	CAP déstockage Cr - 10827	47	2,626960445		
	Base	CAP déstockage Cr - 11022	15	0,626304066		
B3 -Déchets arseniés	Base	CAP déstockage Cr - 11203	6	0,365108185		
	Base	CAP déstockage Hg - 1026	22	1,980304473	89,4853	
	Base	CAP déstockage Hg - 10127	71	44,94964574		
	Base	CAP déstockage Hg - 10211	310	33,40544985		
B3 -Déchets arseniés	Base	CAP déstockage Hg - 10740	41	5,523287966		
	Base	CAP déstockage Hg - 10915	19	3,627470488		
	Base	CAP déstockage Cd - 811	2540	1362,193468	1540,8204	
	Base	CAP déstockage Cd - 812	99	20,13517081		
B3 -Déchets arseniés	Base	CAP déstockage Cd - 813	20	1,260995054		
	Base	CAP déstockage Cd - 814	32	1,890586452		
	Base	CAP déstockage Cd - 815	38	4,655180246		
	Base	CAP déstockage Cd - 1009	880	59,34154333		
	Base	CAP déstockage Cd - 10818	1859	91,34346823		
	Base	109	260	21,75099447	77,0479	
B3 -Déchets arseniés	Opportunité	510	134	12,40927952		
	Opportunité	10514	12	1,83592014		
	Opportunité	20307	113	13,2257429		
	Opportunité	990103	229	21,01128072		
	Opportunité	990409	53	6,814663746		
	Opportunité	10221	2	0,208319997	1,5580	
B10-Produits phytosanitaires	Opportunité	990609	14	1,084859981		
	Opportunité	508	19	0,0435268	0,7200	
B3 -Déchets arseniés	Exclu	704	3	0		
	Exclu	803	3	0		
	Exclu	10125	12	0		
	Exclu	11008	6	0		
	Exclu	11124	9	0		
	Exclu	20127	8	0		
	Exclu	20507	24	0,206193508		
	Exclu	981017	9	0		
	Exclu	990109	18	0		
	Exclu	990408	20	0,160902109		
	Exclu	990610	13	0,309528939		
	B6 -Terres polluées	Exclu	5	20	0,007325621	0,2146
		Exclu	217	5	0,000197761	
		Exclu	313	96	0,003347221	
		Exclu	319	14	7,63877E-05	
		Exclu	402	19	0,007968422	
Exclu		403	21	0,005260347		
Exclu		611	2	0		
Exclu		613	12	0,008570246		
Exclu		619	14	0,000336024		
Exclu		710	29	0,000269934		
Exclu		805	9	0,000100598		
Exclu		901	13	0,005392828		
Exclu		903	7	0,002000554		
Exclu		925	17	0,00027413		
Exclu		1010	15	0,000468451		
Exclu		1014	3	0		
Exclu		1124	70	0,017550889		
Exclu		1221	67	0,000692917		
Exclu		10120	40	0,00050976		
Exclu		10202	18	0,011518792		
Exclu		10203	34	0		
Exclu		10215	11	0		
Exclu		10230	7	0,000177505		
Exclu		10309	3	0		
Exclu		10315	11	0,000156598		
Exclu		10502	18	0		
Exclu		10525	2	7,13776E-05		
Exclu		10607	1	0		
Exclu		10621	6	0		
Exclu		10623	23	0,000277657		
Exclu		10701	20	0,000430924		
Exclu		10824	32	0,000920205		
Exclu		10903	428	0,01284318		
Exclu		10904	42	0		
Exclu		10911	14	0,023373897		
Exclu		10913	78	0,047894131		
Exclu	10914	11	0			
Exclu	11015	6	0,001897262			
Exclu	11108	5	0			
Exclu	11123	14	0,000587446			
Exclu	11128	14	0,000383544			
Exclu	11215	2	0			
Exclu	20124	3	9,66919E-05			
Exclu	20131	60	0			
Exclu	20304	25	0,000591521			
Exclu	20305	11	0,000212821			
Exclu	20314	13	0,008363843			
Exclu	20402	20	0			
Exclu	20403	9	0,000296927			
Exclu	20425	2	0			
Exclu	20531	157	0,002494623			
Exclu	20601	20	0			
Exclu	20612	8	0,000135428			
Exclu	20613	315	0,005550732			
Exclu	20713	81	0			
Exclu	20806	4	0			
Exclu	981108	62	0,000618116			
Exclu	990212	804	0,034829878			
Exclu	990406	8	0,000177479			
Exclu	990806	11	0,000378102			

