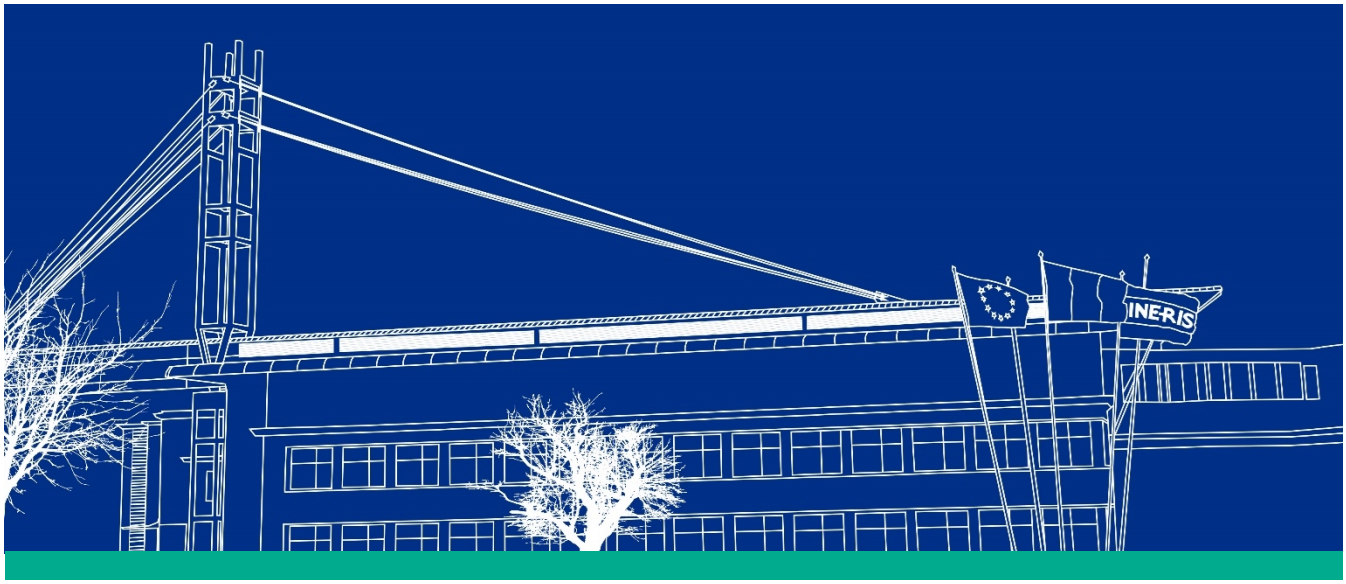
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

INERIS
maîtriser le risque pour un développement durable



(ID Modèle = 454913)

Ineris - 234264 - 2859050 - v1.0

03/06/2026

Retour d'expérience sur l'accidentologie en mines souterraines de sel gemme

PRÉAMBULE

Le présent document a été réalisé au titre de la mission d'appui aux pouvoirs publics confiée à l'Ineris, en vertu des dispositions de l'article R131-36 du Code de l'environnement.

La responsabilité de l'Ineris ne peut pas être engagée, directement ou indirectement, du fait d'inexactitudes, d'omissions ou d'erreurs ou tous faits équivalents relatifs aux informations utilisées.

L'exactitude de ce document doit être appréciée en fonction des connaissances disponibles et objectives et, le cas échéant, de la réglementation en vigueur à la date d'établissement du document. Par conséquent, l'Ineris ne peut pas être tenu responsable en raison de l'évolution de ces éléments postérieurement à cette date. La mission ne comporte aucune obligation pour l'Ineris d'actualiser ce document après cette date.

Au vu de ses missions qui lui incombent, l'Ineris, n'est pas décideur. Les avis, recommandations, préconisations ou équivalent qui seraient proposés par l'Ineris dans le cadre des missions qui lui sont confiées, ont uniquement pour objectif de conseiller le décideur dans sa prise de décision. Par conséquent, la responsabilité de l'Ineris ne peut pas se substituer à celle du décideur qui est donc notamment seul responsable des interprétations qu'il pourrait réaliser sur la base de ce document. Tout destinataire du document utilisera les résultats qui y sont inclus intégralement ou sinon de manière objective. L'utilisation du document sous forme d'extraits ou de notes de synthèse s'effectuera également sous la seule et entière responsabilité de ce destinataire. Il en est de même pour toute autre modification qui y serait apportée. L'Ineris dégage également toute responsabilité pour chaque utilisation du document en dehors de l'objet de la mission.

Nom de la Direction en charge du rapport : DIRECTION SITES ET TERRITOIRES

Rédaction : DJIZANNE Hippolyte

Vérification : GOUZY AURELIEN; AL HEIB MARWAN; FRANCK CHRISTIAN; ZAIER IMEN

Approbation : DUPLANTIER STEPHANE - le 03/06/2026

Liste des personnes ayant participé à l'étude :

Table des matières

1 Résumé Exécutif 7
1.1 Constats Majeurs 7
1.2 Recommandations 7
2 Introduction générale 8
2.1 Contexte 8
2.2 Spécificités géotechniques des mines souterraines de sel gemme 8
2.2.1 Viscoplasticité et fluage : une roche ductile 8
2.2.2 Sensibilité à l'eau : facteur de risque dominant 8
2.2.3 Méthodes d'exploitation, cavités et usages : distinction de périmètre 9
3 Accidentologie des mines de sel gemme 9
3.1 Analyse géographique des accidents 9
3.1.1 Europe 10
3.1.2 Amérique 10
3.2 Analyse typologique des aléas 11
3.3 Évolution temporelle et enseignements des périodes clés 13
3.3.1 Période 1950–1975 : mécanisation et retours d'expérience structurants 13
3.3.2 Période 1975–2000 : industrialisation, reconversions et prise de conscience hydrogéologiques 13
3.3.3 Période 2000–2025 : surveillance renforcée, post-exploitation et risques territoriaux 13
4 Post-exploitation : enseignements d'Asse II et de Morsleben 14
4.1 Asse II : de la mine de sel et de potasse au dépôt à récupérer 14
4.2 Morsleben : stabilisation préventive d'un site fragilisé 14
4.3 Conclusions pour la réglementation 15
5 Enseignements, recommandations et perspectives 15
5.1 Risques majeurs confirmés 15
5.2 Recommandations techniques et réglementaires 15
5.3 Perspective d'extension méthodologique à d'autres substances 16
5.3.1 Potasse : perspective d'extension distincte de la base NaCl 16
5.3.2 Autres substances candidates 16
5.3.3 Séquencement recommandé 16
6 Conclusions 16
7 Références bibliographiques 17
8 Annexes statistiques 19

Liste des figures

Figure 1. Dix accidents les plus meurtriers de la base de données. Le classement porte sur les décès confirmés ; le code d'aléa primaire est indiqué à droite de chaque barre. 9
Figure 2. Fréquence et mortalité par code d'aléa primaire. La lecture croise les aléas fréquents et les aléas les plus meurtriers.....12
Figure 3. Matrice fréquence-létalité par aléa primaire. La taille des points est proportionnelle au nombre de décès confirmés ; les codes correspondent à ceux de la nomenclature du rapport. 12
Figure 4. Synthèse des indicateurs clés de la base accidentologique : Mines souterraines de sel gemme (NaCl), 1864-2025. 19
Figure 5. Répartition géographique des épisodes et des décès. La distribution reflète aussi la disponibilité inégale des sources, notamment anglophones. 20
Figure 6. Évolution temporelle des épisodes, des décès et des blessés par décennie. Les décennies sans épisode documenté ne sont pas représentées ; les blessés sont sous-documentés avant 1950. 21
Figure 7. Cumul des décès confirmés et contribution par décennie. Le cumul met en évidence la concentration de la mortalité sur quelques épisodes historiques. 21
Figure 8. Distribution des épisodes par classes de décès. La grille est analytique et ne constitue pas une cotation réglementaire de la gravité. 22
Figure 9. Exploitation active et post-exploitation / stockage. Le regroupement « exploitation active et assimilée » inclut les phases « exploitation / tourisme » et « exploitation / aléa de surface ». 24
Figure 10. Comparaison indicative sel gemme (NaCl) / potasse (KCl). La comparaison avec KCl est indicative et hors de la base NaCl consolidée ; elle ne vaut pas de mesure définitive. 25

Liste des tableaux

Tableau 1. Typologie des aléas.....11
Tableau 2. Répartition agrégée des épisodes et des décès par famille d'aléas - mines de sel gemme (1864-2025). 12
Tableau 3. Sélection d'accidents récents dans les mines de sel gemme (1975–2025). 13
Tableau 4. Substances candidates à une extension de la démarche accidentologique. 16
Tableau 5. Indicateurs clés de l'accidentologie (1864-2025) 19
Tableau 6. Répartition géographique 19
Tableau 7. Évolution temporelle par décennie 20
Tableau 8. Répartition par code d'aléa primaire.....21
Tableau 9. Distribution par classes numériques de décès 22
Tableau 10. Accidents les plus meurtriers.....23
Tableau 11. Exploitation active, post-exploitation et stockage 23
Tableau 12. Potasse : comparaison indicative hors base NaCl 24
Tableau 13. Tableau de bord décisionnel 25
Tableau 14. Note méthodologique 25

Résumé

Cette note présente un retour d'expérience international sur l'accidentologie des mines souterraines de sel gemme (NaCl) entre 1864 et 2025, dans le cadre de l'appui apporté à la révision du Règlement général des industries extractives.

L'analyse repose sur une base de référence construite par l'Ineris à partir de 46 enregistrements bruts audités, ramenés à 35 épisodes accidentels documentés, représentant 66 décès confirmés et au moins 10 blessés dans 7 pays. L'objectif n'est pas l'exhaustivité historique absolue, mais la constitution d'une base factuelle cohérente, traçable et utile à la décision publique.

Le périmètre porte prioritairement sur les mines souterraines de sel gemme. Les cavités issues de la dissolution, les usages de stockage et certains cas voisins relevant des évaporites sont mobilisés uniquement lorsqu'ils apportent un enseignement utile ; ils sont alors signalés comme cas périphériques, doctrinaux ou hors de la base stricte du NaCl.

L'étude confirme que la vulnérabilité à l'eau constitue la spécificité géotechnique majeure du sel gemme. Bien que l'halite présente un comportement viscoplastique et tende à refermer progressivement les vides par fluage, cette propriété ne protège pas contre une venue d'eau rapide. Les ennoyages et les inondations constituent l'aléa primaire le plus fréquent de la base de référence.

La mortalité est en revanche dominée par les incendies et les explosions, qui représentent 52 des 66 décès, soit près de 79% des décès confirmés. Les phénomènes thermiques et les explosions constituent donc les scénarios les plus létaux de la base tandis que les perturbations hydrogéologiques entraînent surtout des pertes d'ouvrages et des dommages territoriaux majeurs.

La base est dominée par des informations provenant des États-Unis, qui concentrent 20 épisodes accidentels et 53 décès. Cette surreprésentation reflète la disponibilité des archives techniques et réglementaires anglophones ; elle impose de rester prudent dans l'interprétation géographique et temporelle.

La baisse apparente du nombre d'accidents recensés depuis les années 1980 ne peut pas être interprétée comme une baisse robuste du risque unitaire. Elle peut résulter du recul du nombre de sites actifs, de la mécanisation, des progrès en matière de prévention, mais aussi d'effets documentaires. L'amélioration du reporting peut, selon les périodes, accroître la détection d'accidents ou d'incidents mineurs plutôt que de réduire le nombre d'accidents recensés.

Enfin, la note souligne le poids croissant de la post-exploitation, non seulement en matière de sécurité, mais aussi en matière de coûts, de gouvernance, d'environnement et d'acceptabilité sociale. Asse II, Morsleben, Stocamine, Hutchinson ou Maceió ne doivent pas être confondus avec la base stricte des accidents d'exploitation NaCl, mais constituent des retours d'expérience utiles pour la doctrine de surveillance, de garanties financières et de gestion à long terme

Pour citer ce document, utilisez le lien ci-après :

Institut national de l'environnement industriel et des risques, , Verneuil-en-Halatte : Ineris - 234264 - v1.0, 03/06/2026.

Mots-clés :

sel gemme ; accidentologie ; ennoyage ; post-exploitation ; réglementation ; RGIE ; SIT05

Abstract

This note presents an international review of accident experience in underground rock salt (NaCl) mines from 1864 to 2025, as part of the technical support provided for the revision of the French General Regulation for Extractive Industries.

The analysis is based on a reference dataset developed by Ineris from 46 audited raw records, consolidated into 35 documented accident episodes, accounting for 66 confirmed fatalities and at least 10 injured persons across 7 countries. The objective is not to achieve absolute historical exhaustiveness, but to establish a coherent, traceable, and decision-oriented factual basis for public policy.

The scope focuses primarily on underground rock salt mines. Solution-mined caverns, storage uses, and certain related cases involving evaporites are considered only where they provide relevant lessons. In such cases, they are explicitly identified as peripheral, doctrinal, or outside the strict NaCl reference dataset.

The study confirms that water vulnerability is the main geotechnical characteristic of rock salt. Although halite exhibits viscoplastic behaviour and progressively closes voids through creep, this property does not protect against rapid water inflow. Inundation and flooding are the most frequent primary hazards in the reference dataset.

Fatalities, however, are dominated by fires and explosions, which account for 52 of the 66 deaths, i.e., nearly 79% of confirmed fatalities. Thermal phenomena and explosions, therefore, represent the most lethal scenarios in the dataset, whereas hydrogeological disturbances primarily result in the loss of underground works and major territorial damage.

The dataset is dominated by information from the United States, which accounts for 20 accident episodes and 53 fatalities. This overrepresentation reflects the availability of English-language technical and regulatory archives and requires caution when interpreting geographical and temporal trends.

The apparent decrease in the number of recorded accidents since the 1980s cannot be interpreted as robust evidence of a decrease in unit risk. It may result from the decline in the number of active sites, mechanisation, improvements in prevention, and documentary effects. Depending on the period considered, improved reporting may increase the detection of minor accidents or incidents rather than reduce the number of recorded events.

Finally, the note highlights the growing importance of the post-mining phase, not only for safety but also for costs, governance, environmental issues, and social acceptability. Asse II, Morsleben, Stocamine, Hutchinson, and Maceió should not be confused with the strict reference dataset of NaCl mining accidents. However, they provide useful lessons for developing doctrines on monitoring, financial guarantees, and long-term management.

Keywords: rock salt; underground mine; accident experience; inundation; post-mining; RGIE; SIT05.

1 Résumé Exécutif

Ce rapport porte sur la réalisation d'un retour d'expérience international sur l'accidentologie observée dans les mines souterraines de sel gemme (en phase d'exploitation comme en post-exploitation) et sur la formulation de recommandations opérationnelles. Dans ce cadre, l'Ineris a constitué une base de référence de 35 épisodes accidentels documentés, issus de 46 enregistrements bruts audités, survenus dans des exploitations ou des ouvrages de sel gemme entre 1864 et 2025. Ces accidents ont causé 66 décès confirmés et, a minima, 10 blessés documentés. L'objectif n'est pas l'exhaustivité absolue, mais la constitution d'un socle d'éléments factuels cohérents, traçables et directement mobilisables pour l'administration[1].

1.1 Constats Majeurs

- L'interaction eau-sel constitue l'aléa structurant : le sel gemme est viscoplastique et fluant, mais la fermeture lente des vides ne protège pas contre une venue d'eau rapide. L'accident de Retsof en 1994 et l'ennoyage de Jefferson Island / Lake Peigneur en 1980 montrent qu'une perte d'intégrité hydraulique peut entraîner une perte quasi-totale de l'ouvrage.
- La mortalité est concentrée dans les phénomènes de combustion et d'explosion. Les incendies et les explosions totalisent 8 épisodes sur 35, mais 52 décès sur 66. Le gaz doit donc être considéré comme un facteur causal possible, tandis que l'explosion constitue le scénario d'accident. Les incendies relèvent, quant à eux, des phénomènes thermiques.
- Les effondrements, éboulements et chutes de toit restent des scénarios critiques pour la sécurité des travailleurs et des territoires. Même si leur mortalité cumulée est inférieure à celle des incendies et des explosions dans la base de données, leur cinétique peut être brutale et, en matière de gestion d'urgence, comparable à certains scénarios explosifs.
- La post-exploitation devient un enjeu technique, financier, environnemental, sanitaire et de gouvernance. Les cas Asse II et de Morsleben ne sont pas traités comme de simples accidents, mais comme des situations de gestion à long terme dans des ouvrages salins.

Les annexes statistiques confirment et quantifient ces constats. Elles montrent notamment que la base de référence comprend 35 épisodes accidentels, 66 décès confirmés et au moins 10 blessés documentés. Elles permettent également de distinguer les aléas fréquents, en particulier les inondations et les ennoyages, des aléas les plus létaux, principalement les incendies et les explosions. Ces annexes ne constituent donc pas seulement un complément documentaire ; elles fondent la hiérarchisation des risques et des recommandations formulées dans le corps du rapport.

1.2 Recommendations

Pour pallier ces vulnérabilités, l'Ineris recommande les dispositions suivantes :

- Mettre en place une surveillance hydrogéologique continue (y compris sur des sites considérés comme fermés ou abandonnés), avec des seuils d'alerte et des procédures d'intervention clairement définis.
- Compléter cette surveillance par un suivi géomécanique, des inspections périodiques, une gestion documentaire consolidée et des plans d'urgence adaptés.
- Constituer des garanties financières proportionnées aux risques résiduels, aux usages futurs, aux coûts potentiels de remédiation et aux enjeux environnementaux (surveillance)
- Distinguer explicitement, dans les prescriptions, les mines souterraines à chambres et piliers, les cavités de dissolution, les ouvrages de stockage et les situations de post-exploitation.
- Préparer, en perspective, une extension méthodologique à la potasse, sans mélanger les résultats de la base NaCl avec ceux d'une base KCl qui n'aurait pas encore bénéficié du même niveau de consolidation.

---

[1] *Note statistique : les blessés non mortels sont insuffisamment documentés avant 1950 pour permettre des comparaisons robustes. L'analyse privilégie donc les décès confirmés, les pertes d'ouvrages et les dommages majeurs ; un taux rapporté à la production serait utile pour les sous-périodes récentes, mais il n'est pas robuste à l'échelle 1864-2025 faute de séries homogènes par site et par pays.*

2 Introduction générale

2.1 Contexte

La présente note vise à constituer un retour d'expérience systématique et documenté sur l'accidentologie des mines souterraines de sel gemme (NaCl) sur la période 1864-2025, en distinguant l'exploitation, la post-exploitation et les usages de stockage lorsqu'ils peuvent être identifiés.

Le retour d'expérience est volontairement international. Il couvre plusieurs bassins miniers en Europe, en Amérique du Nord et en Amérique du Sud. Cette couverture ne doit toutefois pas être interprétée comme exhaustive : elle reflète fortement l'inégale disponibilité des sources, notamment des archives techniques et réglementaires anglophones.

Le document ne traite pas du patrimoine minier en tant que tel, mais des mécanismes de dommages récurrents : dissolution, inondation, ennoyage, effondrement, affaissement, incendie, explosion, migration de gaz et accidents liés aux ouvrages ou aux engins. Les cas post-miniers ou de stockage sont mobilisés lorsqu'ils éclairent la doctrine de surveillance à long terme.

La base de données utilisée repose sur 46 enregistrements bruts audités, ramenés à 35 épisodes accidentels dans la base de référence, pour 66 décès confirmés et 10 blessés documentés *a minima.* Elle a été constituée à partir d'archives techniques, de rapports officiels, de publications scientifiques et de sources journalistiques recoupées, puis harmonisées selon la nomenclature du rapport interne d'appui Ineris de référence (Ineris-201223-2724323).

2.2 Spécificités géotechniques des mines souterraines de sel gemme

2.2.1 Viscoplasticité et fluage : une roche ductile

Le sel gemme, ou halite (NaCl), est une roche ductile dont le comportement rhéologique est viscoplastique et sensible aux variations de température. Sous contrainte soutenue, il se déforme par fluage et tend à refermer progressivement les vides créés par l'extraction. Cette propriété peut contribuer à la fermeture de certaines discontinuités sous compression, mais elle ne garantit ni l'étanchéité absolue ni la sûreté automatique à court terme des ouvrages (Dusseault & Fordham, 1993 ; Bérest & Brouard, 2003).

La fermeture progressive des vides peut même modifier la distribution des contraintes, accroître la convergence et rendre la surveillance géomécanique nécessaire, en particulier dans les exploitations profondes ou anciennes.

2.2.2 Sensibilité à l'eau : facteur de risque dominant

La forte solubilité de l'halite demeure le principal facteur de risque géotechnique. Une venue d'eau, même localisée, peut dissoudre les parois, fragiliser les piliers, créer des cheminements préférentiels et accélérer la dégradation de l'ouvrage.

L'accident de Retsof (1994) demeure le cas de référence d'une mine sèche endommagée puis perdue à la suite d'une intrusion d'eau. Maceió constitue un retour d'expérience voisin, en dehors de la base stricte des mines souterraines par chambres et piliers, car il concerne des affaissements, des déformations et des risques d'effondrement associés à des cavités de dissolution du sel en contexte urbain. (USGS, 1999 ; Braskem, 2024).

Les cas allemands d'Asse II et de Morsleben confirment que l'argument de « la barrière saline » ne peut être mobilisé sans une analyse hydrogéologique, géomécanique et de sûreté à long terme. Ces cas sont traités ici comme des retours d'expérience doctrinaux de post-exploitation et de stockage, et non comme des accidents d'exploitation de NaCl (BGE, 2017 ; BGE, 2024).

2.2.3 Méthodes d'exploitation, cavités et usages : distinction de périmètre

La base de référence distingue les méthodes d'exploitation des usages ultérieurs des ouvrages. Cette distinction est indispensable, car les modes de création des vides, les régimes de risque et les responsabilités de surveillance ne sont pas identiques.

Catégorie	Description	Points de vigilance
Chambres et piliers	Exploitation souterraine conventionnelle laissant des piliers de sel pour soutenir le toit.	Dimensionnement des piliers, chutes de toit, altération par l'eau, convergence, affaissements.
Chambres et piliers remblayés	Variante où des volumes exploités sont remblayés afin de contribuer au confinement ou à la stabilité.	Tenue des piliers à grande profondeur, interaction remblai-pilier, suivi géomécanique. Certains sites de potasse ou de sel atteignent ou dépassent 500 m de profondeur.
Exploitation par dissolution (*solution mining*)	Injection d'eau pour dissoudre le sel et créer des cavités, ou pour en extraire la saumure.	Stabilité des cavités, coalescence, affaissements, gestion des saumures, interfaces avec les forages.
Cavités de stockage	Utilisation de cavités ou d'ouvrages salins pour le stockage de gaz, d'hydrocarbures, de déchets ou de fluides.	Étanchéité, pression, migration de gaz, interaction avec les ouvrages voisins, intégrité mécanique, surveillance à long terme.
Post-exploitation	Situation après l'arrêt de l'exploitation, avec ou sans reconversion.	Surveillance hydrogéologique et géomécanique, coûts, gouvernance, usages futurs, garanties financières.

Les stockages ne sont donc pas présentés comme une méthode d'exploitation. Ils relèvent d'un usage postérieur ou parallèle du sous-sol, susceptible de concerner des cavités de dissolution ou des vides miniers, selon les configurations.

3 Accidentologie des mines de sel gemme

3.1 Analyse géographique des accidents

Les accidents recensés dans la base de référence proviennent de 7 pays. La distribution observée reflète à la fois l'histoire industrielle des bassins salifères, la disponibilité très inégale des archives et la meilleure accessibilité des sources anglophones. Il s'agit donc d'un retour d'expérience international, mais non exhaustif.

La Figure 1 classe les dix accidents les plus meurtriers selon le nombre de décès confirmés. Elle permet une lecture immédiate des épisodes structurants du retour d'expérience accidentologique.

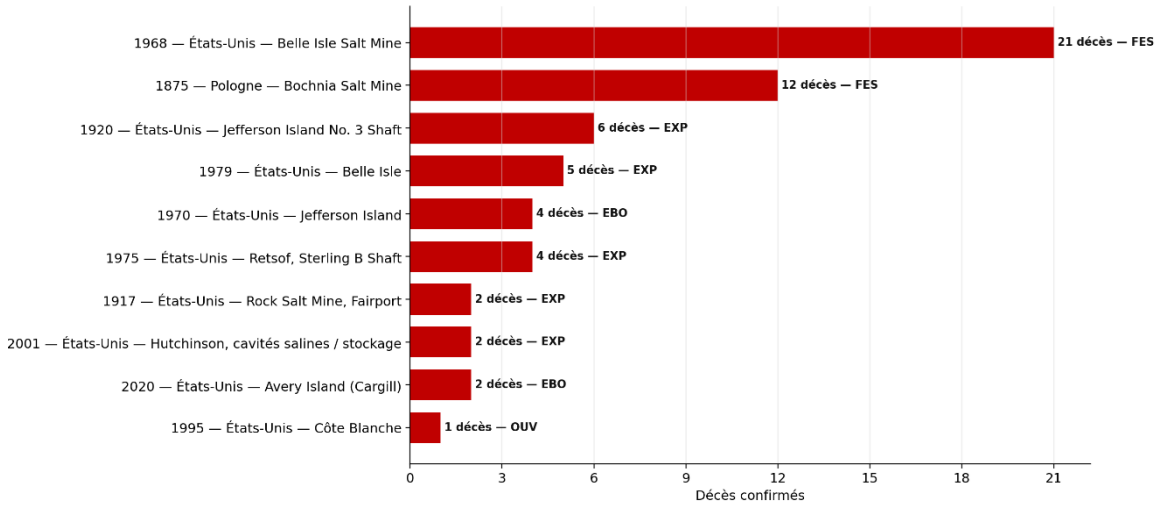


Figure 1. Dix accidents les plus meurtriers de la base de données. Le classement porte sur les décès confirmés ; le code d'aléa primaire est indiqué à droite de chaque barre.

3.1.1 Europe

France. La base de référence française comprend 8 épisodes accidentels, sans décès confirmé.

- Les cas de Varangéville (effondrement historique du quartier Saint-Maximilien le 31/10/1873, arrivée d'eau recensée en 1954, puis affaissements et déformations de surface documentés en 2014) et de Cerville-Buissoncourt (suivi expérimental engagé à partir de 2004 et effondrement contrôlé d'une cavité saline le 13/02/2009) illustrent la persistance de risques d'interactions eau-sel, de mouvements de terrain et de déformations différées.
- Le cas Stocamine (stockage souterrain exploité de 1999 à 2002, puis interrompu à la suite de l'incendie du 10/09/2002) est situé dans une ancienne mine de potasse ; il est donc hors de la base stricte de NaCl, mais reste utile pour la doctrine de post-exploitation des évaporites, notamment pour les coûts, la gouvernance, l'acceptabilité sociale et la gestion des déchets.

Allemagne. Dans la base stricte des accidents d'exploitation de NaCl, l'Allemagne apparaît faiblement représentée avec un épisode d'exploitation documenté à Berchtesgaden le 25/09/2019. En revanche, elle occupe une place importante dans les retours d'expérience doctrinaux relatifs à la post-exploitation et au stockage.

- Asse II est une ancienne mine de potasse et de sel, utilisée pour le stockage de déchets radioactifs entre 1967 et 1978 ;
- Morsleben est un dépôt situé dans une ancienne mine de sel ayant reçu des déchets radioactifs de 1971 à 1998, avant une phase de stabilisation dont les travaux achevés en 2011 représentaient déjà 163 M€. Ces deux situations doivent être présentées comme des cas de post-exploitation et de stabilisation à forts enjeux, et non comme des accidents d'exploitation au sens strict.

Pologne. Wapno, en 1977, reste un cas majeur de perte de mine liée à l'infiltration d'eau et à la subsidence de surface. La Pologne constitue également le deuxième contributeur de mortalité dans la base, en raison de l'incendie de Bochnia en 1875, qui a fait 12 morts.

Roumanie. À Praid, les inondations de mai 2025 ont entraîné la fermeture temporaire de la mine et des activités touristiques, ainsi qu'un renforcement de la surveillance. Ce retour d'expérience est retenu comme un cas récent de venue d'eau et d'instabilité associée dans un ouvrage salin encore accessible au public.

Un mécanisme commun : lorsque l'eau retrouve un accès au massif salifère, la cinétique de dommage peut rapidement dépasser celle de la fermeture par fluage.

3.1.2 Amérique

États-Unis. La base de référence y regroupe 20 épisodes accidentels et 53 décès sur 66.

- L'accident de Retsof, dans l'État de New York en 1994, est une référence en matière de conséquences hydrogéologiques et de surface d'un ennoyage majeur. Belle Isle, en Louisiane, a connu un incendie meurtrier en 1968 puis une explosion mortelle en 1979 ; Avery Island, également en Louisiane, rappelle en 2020 que le risque de chute de toit demeure présent en exploitation.
- Jefferson Island / Lake Peigneur, en 1980, constitue un cas d'école d'interface entre les activités minières et les autres usages du sous-sol. Le percement accidentel du toit de la mine par un forage pétrolier a provoqué l'ennoyage de l'ouvrage, sans décès directement imputé à l'ennoyage dans la base, mais avec une perte quasi totale de la mine et des dommages importants.

Canada. Le Canada apparaît faiblement dans la base consolidée, avec un épisode accidentel et un décès. Cette faible représentation peut traduire soit une accidentologie moindre dans le périmètre retenu, soit un biais documentaire.

Brésil. Maceió constitue un retour d'expérience majeur, mais périphérique par rapport aux mines souterraines conventionnelles par chambres et piliers. Le cas concerne des affaissements, des

déformations et des risques d'effondrement associés à des cavités de dissolution du sel et à une forte exposition urbaine. Il illustre l'importance des interfaces entre l'exploitation, l'urbanisme, la surveillance et la réparation socioéconomique.

Les tableaux statistiques présentés en annexe précisent le poids relatif des différents pays dans la base de référence. Cette distribution ne doit toutefois pas être interprétée comme une mesure directe du risque par pays. Elle reflète aussi les effets de la disponibilité documentaire, notamment l'accessibilité des sources anglophones, et l'absence de dénominateurs homogènes tels que le nombre de mines actives, les tonnages extraits ou les durées d'exploitation.

3.2 Analyse typologique des aléas

La typologie des aléas est présentée dans le Tableau 1 avant l'analyse afin d'éviter toute ambiguïté entre l'origine minière, le phénomène physique et le scénario accidentel. Les explosions peuvent avoir une origine minière ou gazière, mais sont présentées ici comme des scénarios accidentels de nature technologique ou physico-chimique.

Tableau 1. Typologie des aléas.

Famille d'aléas	Codes associés	Définition opérationnelle
Aléas hydrogéologiques	IBE	Inondation, venue d'eau ou ennoyage. L'inondation désigne l'entrée ou la présence d'eau dans les travaux ; l'ennoyage désigne un remplissage durable ou progressif d'une partie significative de l'ouvrage, susceptible de conduire à la perte de fonction de l'ouvrage.
Aléas miniers / géotechniques	MVT, EBO, FON, EFG, SUB	Mouvements de terrain, éboulements, chutes de toit, fontis, effondrements localisés ou généralisés, affaissements progressifs.
Aléas technologiques ou physico-chimiques	FES, EXP, OUV	Incendies, explosions, phénomènes liés au gaz, accidents liés aux ouvrages, aux engins ou aux interfaces techniques.
Non classés	NC	Données insuffisantes pour attribuer un code fiable.

La lecture par code d'aléa primaire, fournie en annexe, permet d'affiner cette analyse agrégée. Les inondations et les ennoyages constituent le code le plus fréquent avec 11 épisodes, soit 31,4 % de la base, mais aucun décès direct documenté. À l'inverse, les incendies ne représentent que 2 épisodes, mais totalisent 33 décès, soit 50 % de la mortalité confirmée. Les explosions représentent 6 épisodes et 19 décès. Cette dissociation entre fréquence et létalité justifie de traiter simultanément les scénarios hydrogéologiques, en raison de leur capacité à entraîner des pertes d'ouvrage, et les scénarios thermiques ou explosifs, en raison de leur criticité pour l'homme.

La Figure 2 compare, pour chaque code d'aléa primaire, le nombre d'épisodes et les décès associés. Elle illustre la dissociation entre la fréquence des ennoyages et la létalité des incendies et des explosions.

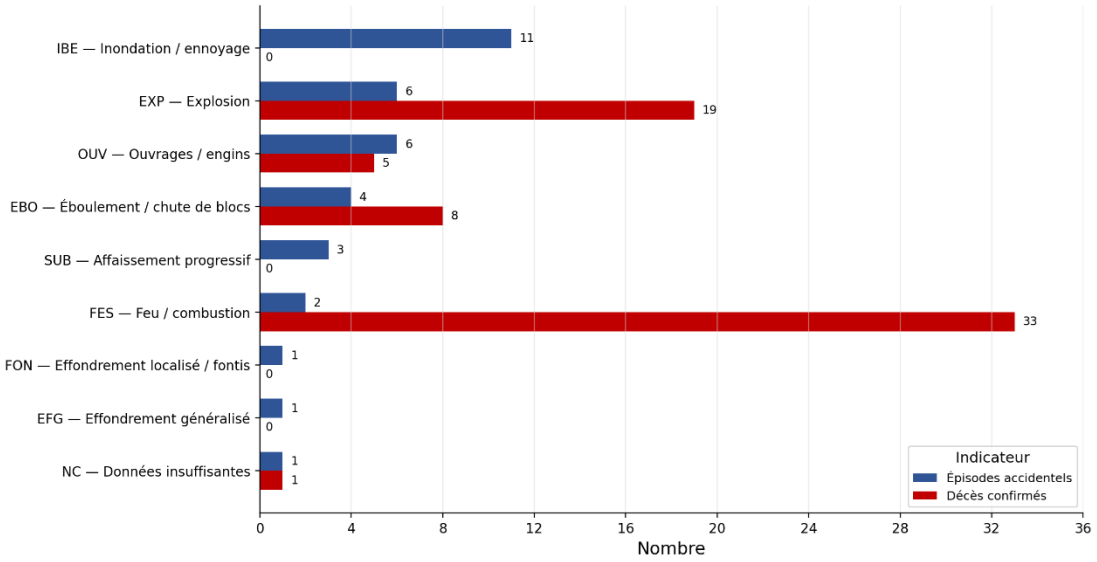


Figure 2. Fréquence et mortalité par code d'aléa primaire. La lecture croise les aléas fréquents et les aléas les plus meurtriers.

La Figure 3 propose une lecture croisée fréquence-létalité des aléas primaires. Elle aide à distinguer les scénarios fréquents, les très létaux et les rares mais néanmoins critiques.

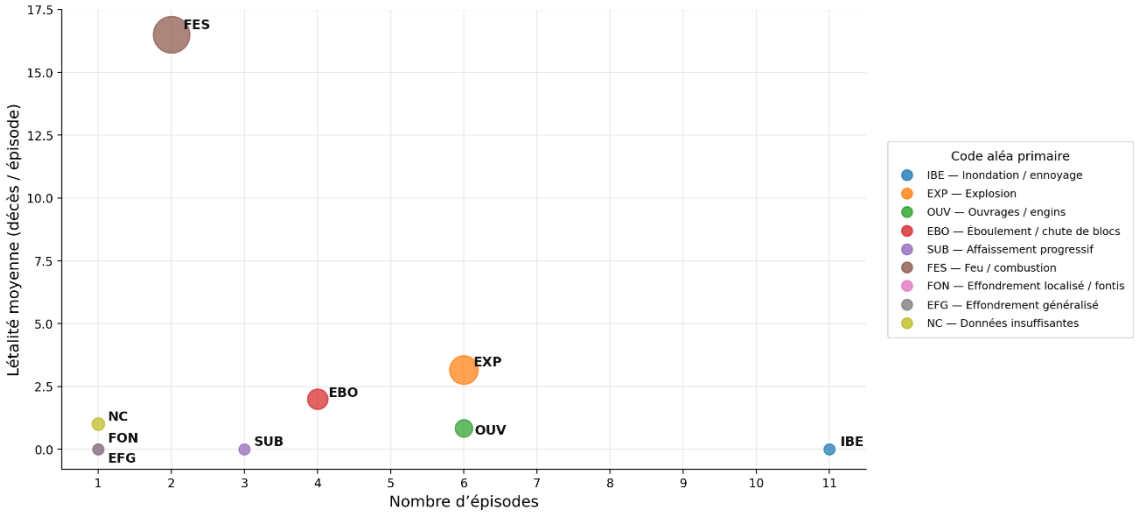


Figure 3. Matrice fréquence-létalité par aléa primaire. La taille des points est proportionnelle au nombre de décès confirmés ; les codes correspondent à ceux de la nomenclature du rapport.

Tableau 2. Répartition agrégée des épisodes et des décès par famille d'aléas - mines de sel gemme (1864-2025).

Famille	Codes inclus	Épisodes	Fréquence	Décès	Mortalité
Hydrogéologique	IBE	11	31,4 %	0	0,0 %
Minier / géotechnique	EBO, SUB, FON, EFG	9	25,7 %	8	12,1 %
Technologique ou physico-chimique	FES, EXP, OUV	14	40,0 %	57	86,4 %
Non classé	NC	1	2,9 %	1	1,5 %
TOTAL		35	100 %	66	100 %

La lecture statistique doit distinguer la fréquence de la létalité. Les aléas hydrogéologiques influencent la fréquence des aléas et les pertes d'ouvrage. Les incendies et les explosions dominent la mortalité. Les mouvements de terrain, y compris les effondrements, peuvent toutefois présenter une cinétique

brutale et demeurent prioritaires dans l'analyse de sécurité, même lorsque la mortalité cumulée observée est moindre.

3.3 Évolution temporelle et enseignements des périodes clés

Pour rester lisible et utile à la révision réglementaire, l'évolution est synthétisée en trois séquences contemporaines, bien que la base de référence remonte à 1864. Les intitulés ont été neutralisés afin d'éviter d'évoquer des « réformes » non documentées de manière homogène entre les pays.

La baisse apparente des accidents recensés depuis les années 1980 résulte probablement d'un faisceau de causes : diminution du nombre de sites actifs dans certains bassins, progrès de la prévention, mécanisation, évacuation plus rapide, disponibilité documentaire variable et évolution du reporting. Un meilleur reporting peut accroître la détection d'accidents ou d'incidents ; il ne peut donc pas être traité mécaniquement comme un facteur de baisse. En l'absence de séries homogènes de production ou de nombre de sites actifs, la base ne permet pas de calculer un taux d'accident robuste par tonne extraite.

3.3.1 Période 1950–1975 : mécanisation et retours d'expérience structurants

Cette période est marquée par la mécanisation progressive, des dispositifs de surveillance encore limités et plusieurs accidents d'exploitation significatifs. Les accidents documentés relèvent notamment de défauts de conception, de chutes de toit, d'incendies ou de maîtrises hydrauliques insuffisantes.

3.3.2 Période 1975–2000 : industrialisation, reconversions et prise de conscience hydrogéologiques

La période connaît des accidents d'exploitation et des pertes d'ouvrages majeures, notamment à Wapno en 1977, à Jefferson Island / Lake Peigneur en 1980 et à Retsof en 1994. Elle correspond également à l'émergence de questions de reconversion et de gestion à long terme dans les ouvrages salins.

Les données décennales détaillées en annexe montrent que la mortalité cumulée est fortement marquée par quelques périodes et quelques accidents majeurs, notamment les années 1870, 1920, 1960 et 1970. Cette concentration temporelle doit être interprétée avec prudence : elle peut traduire des évolutions réelles de l'exploitation et de la prévention, mais aussi des effets de mémoire documentaire, de la disponibilité des sources et de la sous-documentation des accidents anciens. L'annexe confirme donc que l'évolution temporelle doit être lue comme un retour d'expérience historique et non comme une série statistique normalisée du risque.

3.3.3 Période 2000–2025 : surveillance renforcée, post-exploitation et risques territoriaux

La fréquence des accidents mortels diminue dans la base de données, mais des risques territoriaux et post-miniers apparaissent de manière plus visible : explosions de gaz liées au stockage ou à d'anciennes cavités, affaissements urbains associés à des cavités de dissolution, chutes de toit en exploitation active, inondations et fermetures préventives.

Tableau 3. Sélection d'accidents récents dans les mines de sel gemme (1975–2025).

Période	Date / lieu	Description	Conséquences
1975-2000	Wapno, Pologne (1977)	Infiltration d'eau, perte de mine et subsidence.	Dommages de surface ; pertes d'ouvrage.
1975-2000	Jefferson Island / Lake Peigneur, USA (1980)	Percement du toit par forage pétrolier, ennoyage brutal.	Aucun décès directement imputé à l'ennoyage dans la base ; perte majeure de l'ouvrage.
1975-2000	Retsof, New York, USA (1994)	Intrusion d'eau, ennoyage et fontis.	Aucun décès directement imputé à l'ennoyage documenté dans la base ; dégâts hydrogéologiques et fermeture définitive.

Période	Date / lieu	Description	Conséquences
2000-2025	Hutchinson, Kansas, USA (2001)	Explosions de gaz liées au stockage et à d'anciennes cavités salines.	2 décès ; évacuations et crise géologique urbaine.
2000-2025	Varangéville, France (2014)	Mouvements de terrain liés à des instabilités de piliers.	Aucun décès ; dégâts de surface et surveillance renforcée.
2000-2025	Avery Island, Louisiana, USA (2020)	Chute ou rupture de toit en exploitation.	2 décès.
2000-2025	Maceió, Brésil (2018-2024)	Affaissements et risques d'effondrement associés à des cavités de dissolution du sel.	Déplacements massifs de population ; coûts et programmes de compensation importants.
2000-2025	Praid, Roumanie (mai 2025)	Inondation / venues d'eau et instabilités ; fermeture temporaire.	Fermeture de la mine et des activités touristiques ; surveillance et interventions renforcées.

4 Post-exploitation : enseignements d'Asse II et de Morsleben

La post-exploitation constitue un enjeu majeur pour les ouvrages salins. Elle combine des contraintes de stabilité, d'hydrogéologie, de confinement, de coûts, de gouvernance et d'acceptabilité sociale sur des horizons bien plus longs que la phase d'exploitation.

Les cas allemands les mieux documentés, Asse II et Morsleben, relèvent des évaporites salines et de la gestion des déchets radioactifs. Ils sont essentiels pour la doctrine française, même si Asse II n'est pas une mine de sel gemme au sens strict. Ils sont traités comme des situations dégradées ou des cas de stabilisation à forts enjeux, et non comme des accidents d'exploitation.

Les indicateurs présentés en annexe montrent que les épisodes post-exploitation ou liés au stockage restent peu nombreux dans la base consolidée, mais qu'ils peuvent entraîner des conséquences majeures qui ne sont pas correctement traduites par la seule mortalité directe. Cette observation justifie de ne pas limiter l'analyse de criticité au seul nombre de décès, mais d'intégrer également les coûts de remédiation, les dommages territoriaux, la durée de gestion, les enjeux environnementaux et l'acceptabilité sociale.

4.1 Asse II : de la mine de sel et de potasse au dépôt à récupérer

À Asse II, ancienne mine de potasse et de sel gemme, environ 126 000 fûts de déchets radioactifs de faible et de moyenne activité ont été placés dans d'anciennes chambres minières entre 1967 et 1978.

La situation dégradée d'Asse II résulte principalement de la combinaison de l'instabilité de l'ouvrage, d'infiltrations de saumure et d'enjeux de confinement à long terme. Les eaux collectées font l'objet de contrôles radiologiques ; la BGE[2] distingue notamment les solutions prélevées avant contact avec les déchets et les faibles volumes de solutions ayant pu entrer en contact avec les déchets.

Les coûts estimés avant le début de la récupération s'élèvent à environ 4,7 Md€, avec une incertitude importante. Le cas Asse II démontre qu'un ouvrage salin ne peut être considéré comme sûr sur la seule base de la faible perméabilité du sel : la sûreté dépend de l'état des vides, des cheminements hydrauliques, de la gestion des eaux et de la capacité à récupérer ou à confiner les déchets.

4.2 Morsleben : stabilisation préventive d'un site fragilisé

Morsleben illustre une autre configuration : un dépôt dans une ancienne mine de sel gemme, fragilisé par la présence d'anciens vides miniers, par les exigences de stabilité à long terme et par la nécessité de limiter les risques d'infiltration. La stratégie allemande repose sur le remblayage extensif, la construction d'ouvrages de scellement et la fermeture des puits.

[2] La Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) est l'organisme fédéral allemand chargé notamment de la gestion et du démantèlement de dépôts de déchets radioactifs.

Les travaux de stabilisation achevés en 2011 représentaient déjà 163 M€. Ils n'épuisaient pas les coûts de démantèlement, mais visaient la stabilité de l'ouvrage jusqu'à la procédure et à la mise en œuvre des mesures de fermeture autorisées (BGE, 2011 ; BGE, 2024).

4.3 Conclusions pour la réglementation

Quelques enseignements sont présentés ci-dessous en 5 points.

1. L'autocicatrisation du sel ne doit jamais être présentée comme une propriété d'étanchéité absolue.
2. La surveillance hydrogéologique et géomécanique doit se poursuivre après l'arrêt de l'exploitation, avec des seuils d'alerte et des responsabilités clairement définies.
3. Les coûts de post-exploitation peuvent excéder de très loin les coûts d'exploitation initiaux ; ils doivent être intégrés dans une logique de coût-bénéfice et de proportionnalité des garanties financières.
4. La gouvernance, la transparence documentaire et l'acceptabilité sociale conditionnent la faisabilité de toute stratégie de confinement, de remédiation ou de récupération.
5. Les prescriptions doivent distinguer les sites abandonnés, les ouvrages reconvertis, les cavités de stockage et les mines actives.

Ces enseignements plaident directement en faveur de garanties financières robustes, d'obligations de surveillance explicites et d'un cadre réglementaire distinct pour la post-exploitation (BGE, 2024).

5 Enseignements, recommandations et perspectives

5.1 Risques majeurs confirmés

L'analyse accidentologique fait ressortir quatre familles de risques prioritaires, qui combinent soit une fréquence élevée, soit une létalité importante, soit des conséquences territoriales et post-exploitation significatives.

1. **Inondations et ennoyages :** premiers aléas fréquents dans la base, conséquences directes de la solubilité de la halite. Ils entraînent surtout des pertes d'ouvrages et des dommages territoriaux.
2. **Incendies, explosions et gaz :** première cause de mortalité dans la base de référence. Le gaz doit être considéré comme un facteur ou un agent causal possible ; l'explosion constitue le scénario accidentel.
3. **Mouvements de terrain, effondrements et chutes de toit :** risques récurrents pour la sécurité des travailleurs et des territoires, avec une cinétique parfois brutale.
4. **Instabilités à long terme et sites de stockage :** Asse II, Morsleben, Hutchinson, Maceió ou Praid montrent qu'une phase dite post-exploitation ou une interface de stockage peut rester accidentogène ou entraîner des conséquences socioéconomiques majeures.

5.2 Recommandations techniques et réglementaires

Les recommandations suivantes visent à traduire les enseignements tirés du retour d'expérience en mesures opérationnelles de prévention, de surveillance et de gouvernance, adaptées aux spécificités des ouvrages salins.

1. **Surveillance hydrogéologique continue :** suivre les apports en eau, la salinité, la pression et les niveaux, avec des seuils d'alerte prédéfinis.
2. **Suivi géomécanique :** instrumenter les secteurs sensibles, suivre la convergence, les déplacements, les chutes de toit, les affaissements et les signaux précurseurs.
3. **Cartographie et reconnaissance :** utiliser la géophysique, les levés topographiques, les inspections et la consolidation documentaire, sans limiter les prescriptions à une seule technique.
4. **Plans d'urgence :** définir les procédures d'évacuation, les interfaces avec les services de secours, ainsi que les modalités de gestion des venues d'eau, des fuites de gaz et des instabilités rapides.
5. **Gestion documentaire :** conserver les plans, les forages, les historiques d'exploitation, les données d'instrumentation et les informations relatives aux usages de stockage.
6. **Garanties financières :** imposer des garanties proportionnelles aux risques résiduels, aux coûts de surveillance, aux coûts potentiels de remédiation et aux usages futurs.

7. **Urbanisme et interfaces :** contrôler les interactions entre mines, forages, cavités, stockages, réseaux, aménagements de surface et usages futurs.
8. **Partage de données :** développer des échanges structurés avec les instituts et les autorités disposant d'informations accidentologiques, notamment BGE, BGR, MSHA, USGS et Kansas Geological Survey (KGS).

5.3 Perspective d'extension méthodologique à d'autres substances

La présente étude est centrée sur le sel gemme afin de garantir la cohérence géotechnique de l'analyse et la comparabilité des données. La méthodologie développée peut toutefois être étendue à d'autres substances, sous réserve d'une consolidation documentaire équivalente.

5.3.1 Potasse : perspective d'extension distincte de la base NaCl

La potasse (KCl) constitue une candidate prioritaire pour une extension méthodologique, mais elle ne doit pas être mélangée à la base de référence du sel gemme. Les analogies sont fortes : évaporites, solubilité, affaissements, ouvrages profonds et enjeux de post-exploitation. Les différences sont également importantes : interlits argileux, gaz occlus, blowouts, contraintes plus élevées et profondeurs souvent plus importantes.

L'annexe comparative NaCl/KCl doit être lue comme un signal d'orientation méthodologique plutôt que comme une conclusion statistique définitive. Elle suggère une accidentologie potentiellement plus sévère pour la potasse, notamment en raison des gaz occlus, des profondeurs plus importantes et de contextes géotechniques différents. Toutefois, cette comparaison ne pourra être consolidée qu'après un travail de dédoublonnage, de qualification des sources et d'harmonisation équivalent à celui réalisé pour la base NaCl.

5.3.2 Autres substances candidates

Au-delà de la potasse, d'autres familles de substances méritent d'être envisagées dans une perspective à plus long terme :

Tableau 4. Substances candidates à une extension de la démarche accidentologique.

Substance / famille	Analogies avec le sel gemme	Risques spécifiques additionnels
Potasse (KCl)	Évaporites, bassins proches, méthodes souterraines comparables.	Gaz occlus, blowouts, contraintes et profondeurs plus élevées.
Gypse / anhydrite	Roches solubles, dissolution, effondrements, post-exploitation comparable.	Gonflement de l'anhydrite au contact de l'eau.
Houille - post-exploitation	Affaissements, ennoyages, risques résiduels.	Grisou résiduel, échauffement, incendies de terrils.
Minéraux métalliques (fer, zinc)	Chutes de toit, instabilités, ennoyages en mines profondes.	Eaux acides, instabilité des piliers à grande profondeur.
Minéraux critiques (Li, Co, terres rares)	Mines nouvelles et profils de risque émergents.	Données accidentologiques encore lacunaires.

5.3.3 Séquencement recommandé

À court terme, une extension à la potasse pourrait être envisagée en capitalisant sur les données déjà partiellement collectées, sous réserve de séparer explicitement les bases NaCl et KCl.

À moyen terme, le gypse et l'anhydrite pourraient constituer une extension utile. À plus long terme, les mines de charbon en post-exploitation, les minerais métalliques et les minéraux critiques pourraient être étudiés selon des critères harmonisés pour la définition des accidents.

6 Conclusions

Cette note présente un retour d'expérience international et harmonisé sur l'accidentologie des mines souterraines de sel gemme, couvrant la période 1864-2025 et s'appuyant sur une base de référence de 35 épisodes accidentels. Les principaux enseignements se déclinent en quatre messages clés :

1. Les risques spécifiques persistent. L'interaction eau-sel structure la fréquence des accidents et la perte d'ouvrages, tandis que les incendies et les explosions dominent la mortalité observée.
2. La post-exploitation constitue un enjeu majeur, sous l'angle de la sécurité, des coûts, de la santé, de l'environnement et de la gouvernance. Les cas Asse II, Morsleben, Stocamine, Hutchinson, Maceió et Praid montrent que les conséquences peuvent excéder très largement la phase d'exploitation.
3. Les recommandations sont directement mobilisables : surveillance hydrogéologique, suivi géomécanique, plans d'urgence, gestion documentaire, garanties financières, maîtrise des interfaces et partage de données.
4. L'extension méthodologique à la potasse est pertinente, mais elle doit être menée dans une section ou un rapport distinct afin d'éviter de confondre les résultats de la base NaCl avec ceux d'une base KCl, qui reste indicative.

La prévention des accidents dans les mines souterraines de sel gemme requiert donc une approche intégrée : une connaissance fine des ouvrages, une surveillance continue, une hiérarchisation des scénarios critiques et un cadre réglementaire adapté aux spécificités du sel, notamment en post-exploitation.

7 Références bibliographiques

1. Associated Press (2024). Brazil's federal police indict 20 in connection with the salt mine catastrophe in the country's northeast. AP News, November 1 2024. URL: https://apnews.com/article/brazil-braskem-rock-salt-mining-maceio-collapse-77be57ffa1e8e4c1765f64a6829c9511
2. Bérest, P. & Brouard, B. (2003). Safety of salt caverns used for underground storage. Oil & Gas Science and Technology, 58(3), 361-384. DOI : 10.2516/ogst:2003023.
3. BGE - Bundesgesellschaft für Endlagerung (2011). Stabilisation of the Morsleben repository. URL : https://archiv.bge.de/archiv/www.endlager-morsleben.de/Morsleben/EN/topics/safety/stabilisation/stabilisation_node.html
4. BGE - Bundesgesellschaft für Endlagerung (consulté en 2026). Asse II mine in Lower Saxony. URL: https://www.bge.de/en/asse/
5. BGE - Bundesgesellschaft für Endlagerung (consulté en 2026). Salt water in the Asse mine. URL: https://www.bge.de/en/asse/main-topics/main-topic-salt-water-in-the-asse-mine/
6. BGE - Bundesgesellschaft für Endlagerung (consulté en 2026). Zeit- und Kostenplanung der Rückholung radioaktiver Abfälle. URL : https://www.bge.de/de/asse/themenschwerpunkte/themenschwerpunkt-rueckholung/die-zeit-und-kostenplanung/
7. BGE - Bundesgesellschaft für Endlagerung (consulté en 2026). Decommissioning of the Morsleben repository. URL: https://www.bge.de/en/morsleben/short-information/decommissioning-of-the-morsleben-repository/
8. BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (consulté en 2026). Asse II Mine. URL: https://www.bgr.bund.de/EN/Themen/Endlagerung/Standortprojekte/Asse/asse_node_en.html
9. Braskem (2024). Financial Compensation Program Exceeds 18,190 Payouts by February. Maceió-AL, 12 March 2024. URL: https://www.braskem.com/alagoas-news/financial-compensation-program-exceeds-18190-payouts-by-february
10. Braskem (consulté en 2026). Alagoas information and reports. URL: https://www.braskem.com.br/alagoas
11. Dusseault, M.B. & Fordham, C.J. (1993). Time-dependent behaviour of rocks. In J.A. Hudson (ed.), Comprehensive Rock Engineering, Vol. 3, 119-149. Pergamon Press.
12. Galloway, D.L., Jones, D.R. & Ingebritsen, S.E. (eds.) (1999). Land Subsidence in the United States. U.S. Geological Survey Circular 1182. URL: https://pubs.usgs.gov/circ/circ1182/
13. Ineris (2022). Analyse multi-aléa des mines abandonnées. Rapport de référence Ineris-201223-2724323. Document interne/non public à confirmer avant diffusion externe.

14. Kansas Geological Survey (consulté en 2026). Hutchinson Natural Gas Explosion. GeoKansas. URL: https://geokansas.ku.edu/hutchinson-natural-gas-explosion
15. Kansas Geological Survey (2001). Survey Responds to Hutchinson Natural Gas Explosion. GeoRecord, Vol. 7.2. URL: https://www.kgs.ku.edu/Publications/GeoRecord/2001/vol7.2/Page1.html
16. K+S Aktiengesellschaft (consulté en 2026). Mining & factory operations: Room-and-pillar process. URL: https://www.kpluss.com/en-us/about-ks/sites/europe/werra/mining-factory-operations/
17. K+S (consulté en 2026). Underground Waste Disposal - Technical Information. URL: https://www.ks-cz.com/en-data/documents/waste-management-underground-waste-disposal_en.pdf
18. MSHA - Mine Safety and Health Administration (1981). The Jefferson Island Mine Inundation: Report of Mine Inundation, Jefferson Island Mine, Diamond Crystal Salt Company, Louisiana, November 20, 1980. HathiTrust/DPLA record: https://dp.la/item/adc1d167cf0739f1b20612eb037ee686
19. MSHA - Mine Safety and Health Administration (2020). December 14, 2020, Fatalities - Final Report, Avery Island Mine. URL: https://www.msha.gov/data-reports/fatality-reports/2020/december-14-2020-fatalities/final-report
20. SALROM - Societatea Națională a Sării (consulté en 2026). Salina Praid - Harghita. URL: https://salrom.ro/salina-praid-harghita/
21. 64 Parishes (2022). Belle Isle Salt Mine Collapse. Louisiana Endowment for the Humanities. URL: https://64parishes.org/entry/belle-isle-salt-mine-collapse

8 Annexes statistiques

La Figure 4 donne une vue synthétique des principaux ordres de grandeur de la base de référence : nombre d'épisodes, décès confirmés, blessés documentés, pays couverts et poids relatif des accidents mortels.



Figure 4. Synthèse des indicateurs clés de la base accidentologique : Mines souterraines de sel gemme (NaCl), 1864-2025.

Le Tableau 5 présente les indicateurs de cadrage de la base de référence. Il rappelle le volume d'épisodes consolidés, les décès confirmés, les blessés documentés *a minima* et la couverture géographique retenue pour l'analyse accidentologique.

Tableau 5. Indicateurs clés de l'accidentologie (1864-2025)

Indicateur	Valeur	Commentaire
Épisodes accidentels retenus	35	Base de référence consolidée à partir de 46 enregistrements bruts audités.
Décès confirmés	66	L'indicateur le plus robuste sur une longue période.
Blessés documentés a minima	10	Sous-documentation importante avant 1950.
Pays couverts	7	France, Allemagne, Pologne, Roumanie, États-Unis, Canada, Brésil.
Accidents sans décès	18	51,4 % de la base.
Accidents avec décès	17	48,6 % de la base.
Accidents ayant entraîné au moins 10 décès	2	Belle Isle 1968 et Bochnia 1875.

Le Tableau 6 détaille la distribution des épisodes accidentels et des décès par pays. Il permet de distinguer la fréquence documentaire des accidents et la contribution de chaque pays à la mortalité totale observée.

Tableau 6. Répartition géographique

Pays	Épisodes accidentels	% épisodes	Décès	% décès	Sévérité moyenne
États-Unis	20	57,1 %	53	80,3 %	2,65
France	8	22,9 %	0	0,0 %	0,00
Allemagne	1	2,9 %	0	0,0 %	0,00
Pologne	3	8,6 %	12	18,2 %	4,00
Brésil	1	2,9 %	0	0,0 %	0,00
Roumanie	1	2,9 %	0	0,0 %	0,00
Canada	1	2,9 %	1	1,5 %	1,00
TOTAL	35	100 %	66	100 %	1,89

La Figure 5 représente simultanément le nombre d'épisodes et le nombre de décès par pays. Elle permet de visualiser la surreprésentation des États-Unis dans la base de données, ainsi que le poids relatif de la Pologne sur la mortalité totale.

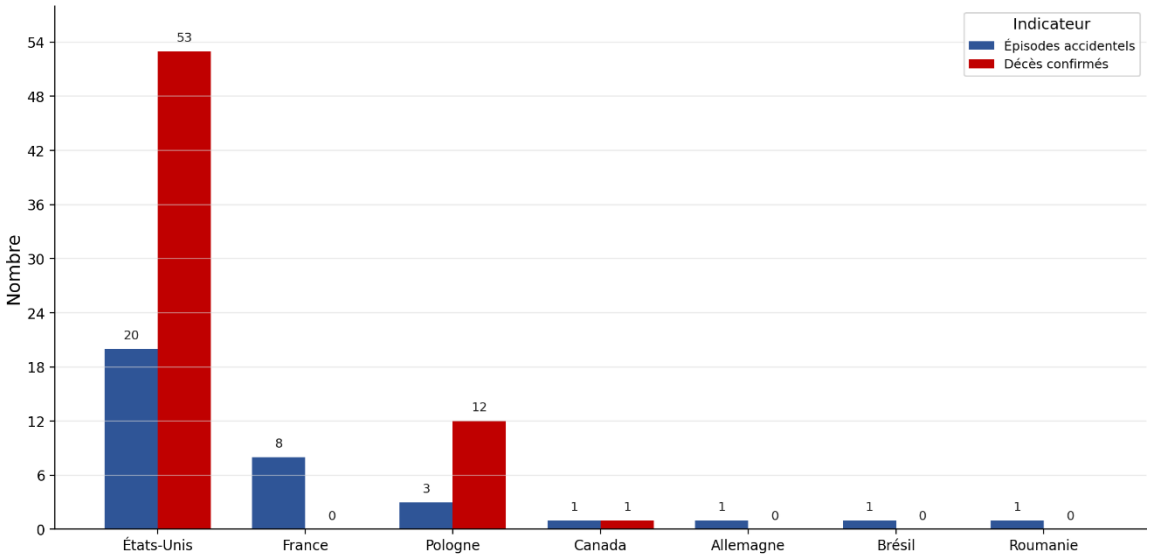


Figure 5. Répartition géographique des épisodes et des décès. La distribution reflète aussi la disponibilité inégale des sources, notamment anglophones.

Le Tableau 7 présente l'évolution temporelle des épisodes, décès et blessés documentés par décennie. Il fournit également le cumul des décès, afin de visualiser les périodes qui contribuent le plus à la mortalité historique de la base.

Tableau 7. Évolution temporelle par décennie

Décennie	Épisodes	Décès	Blessés	Sévérité moy.	Cumul décès
Années 1860	1	0	0	0,00	0
Années 1870	2	12	0	6,00	12
Années 1890	1	0	0	0,00	12
Années 1900	2	0	0	0,00	12
Années 1910	1	2	0	2,00	14
Années 1920	1	6	0	6,00	20
Années 1950	2	0	0	0,00	20
Années 1960	3	21	0	7,00	41
Années 1970	5	13	6	2,60	54
Années 1980	1	0	0	0,00	54
Années 1990	3	1	0	0,33	55
Années 2000	2	3	0	1,50	58
Années 2010	7	5	4	0,71	63
Années 2020	4	3	0	0,75	66
TOTAL	35	66	10	1,89	66

Note : la baisse apparente de la sévérité moyenne après les années 1980 doit être interprétée avec prudence. Elle ne constitue pas un taux de risque unitaire, faute de dénominateurs homogènes par site, par tonnage ou par pays.

La Figure 6 présente l'évolution décennale des épisodes, décès et blessés documentés. Elle doit être interprétée comme une distribution de cas recensés et non comme un taux de risque, faute de dénominateurs homogènes.

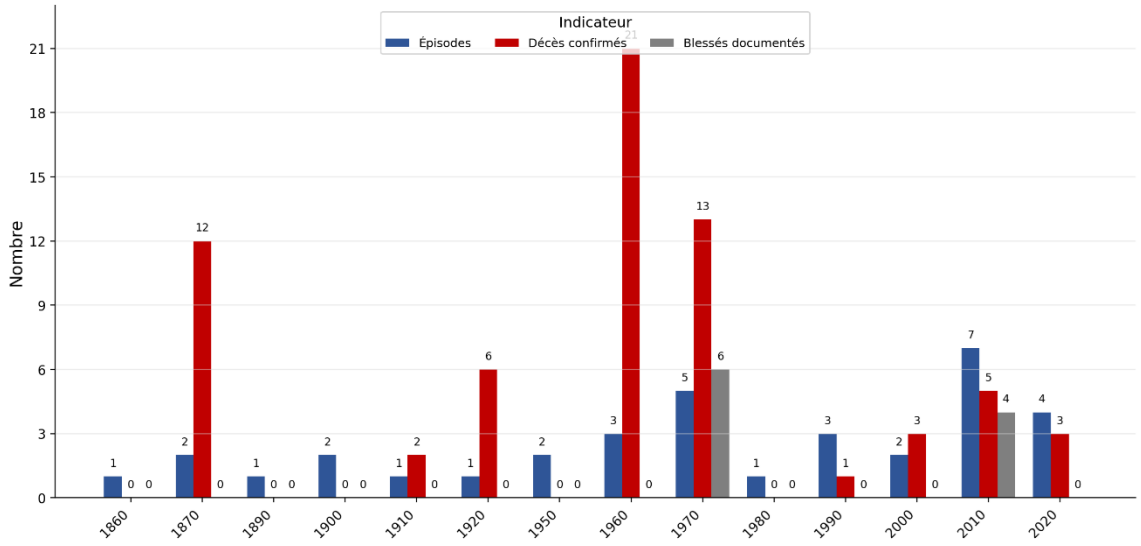


Figure 6. Évolution temporelle des épisodes, des décès et des blessés par décennie. Les décennies sans épisode documenté ne sont pas représentées ; les blessés sont sous-documentés avant 1950.

La Figure 7 complète la lecture temporelle en montrant le cumul des décès confirmés. Elle met en évidence le rôle déterminant de quelques décennies marquées par des accidents collectifs.

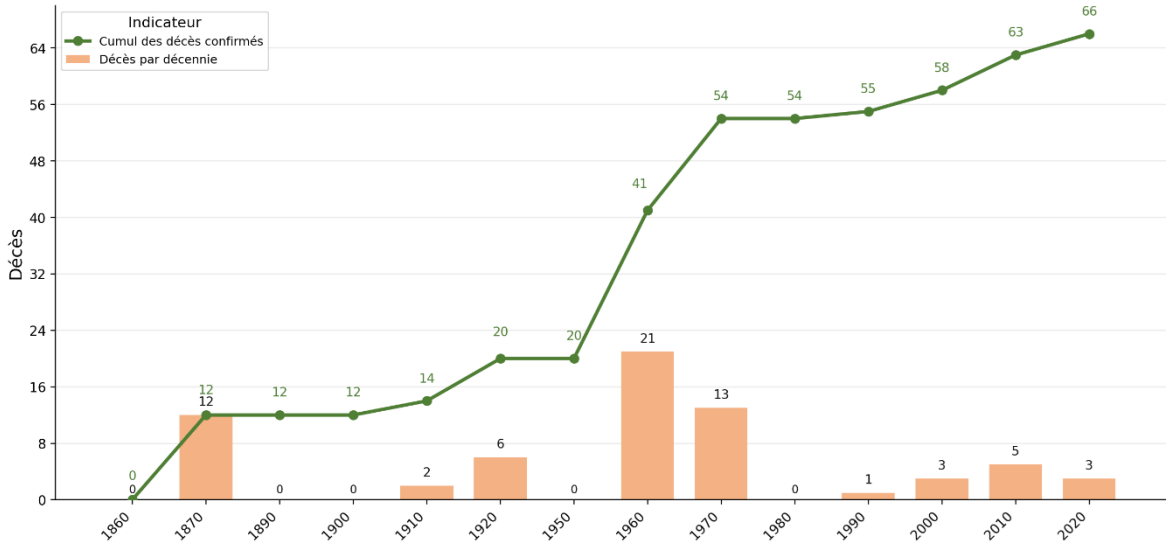


Figure 7. Cumul des décès confirmés et contribution par décennie. Le cumul met en évidence la concentration de la mortalité sur quelques épisodes historiques.

Le Tableau 8 répartit les épisodes selon le code d'aléa primaire attribué à chaque accident. Cette lecture permet de comparer la fréquence des familles de scénarios à leur contribution respective aux décès confirmés.

Tableau 8. Répartition par code d'aléa primaire

Famille	Code	Description	Épisodes	% épisodes	Décès	% décès
Hydrogéologique	IBE	Inondation / ennoyage	11	31,4 %	0	0,0 %
Technologique	EXP	Explosion	6	17,1 %	19	28,8 %
Technologique	OUV	Ouvrages / engins	6	17,1 %	5	7,6 %

Famille	Code	Description	Épisodes	% épisodes	Décès	% décès
Minier / géotechnique	EBO	Éboulement / chute de blocs	4	11,4 %	8	12,1 %
Minier / géotechnique	SUB	Affaissement progressif	3	8,6 %	0	0,0 %
Technologique	FES	Feu / combustion	2	5,7 %	33	50,0 %
Minier / géotechnique	FON	Effondrement localisé / fontis	1	2,9 %	0	0,0 %
Minier / géotechnique	EFG	Effondrement généralisé	1	2,9 %	0	0,0 %
Non classé	NC	Données insuffisantes	1	2,9 %	1	1,5 %
TOTAL			35	100 %	66	100 %

Le Tableau 9 regroupe les accidents selon des classes numériques de décès. Cette présentation évite les qualificatifs subjectifs de gravité et met en évidence la forte proportion d'épisodes sans décès ainsi que le poids des rares accidents collectifs.

Tableau 9. Distribution par classes numériques de décès

Classe numérique	Épisodes	% du total	Décès totaux	Sévérité moyenne
0 décès	18	51,4 %	0	0,00
1-5 décès	14	40,0 %	27	1,93
6-9 décès	1	2,9 %	6	6,00
≥ 10 décès	2	5,7 %	33	16,50
TOTAL	35	100 %	66	1,89

Note : cette grille est analytique et ne constitue pas une cotation réglementaire de gravité. Les qualificatifs subjectifs ont été supprimés au profit de classes numériques.

La Figure 8 visualise la distribution des épisodes selon les classes numériques de décès. Elle montre que la majorité des épisodes n'entraîne pas de décès direct, tandis qu'une part limitée des accidents concentre une part importante de la mortalité.

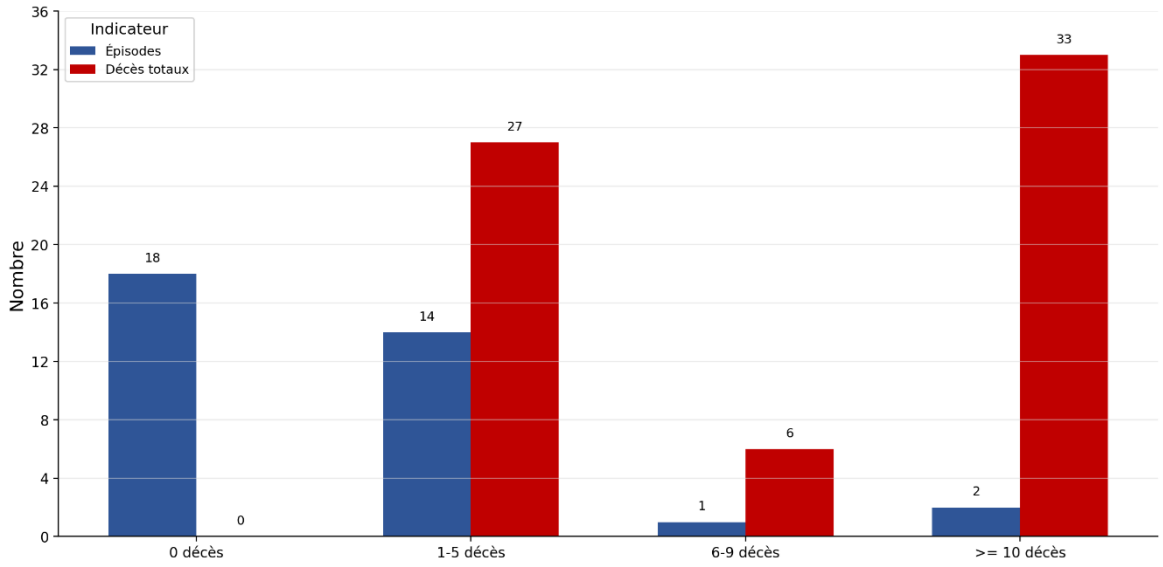


Figure 8. Distribution des épisodes par classes de décès. La grille est analytique et ne constitue pas une cotation réglementaire de la gravité.

Le Tableau 10 liste les dix accidents les plus meurtriers de la base de référence. Il vise à identifier les épisodes structurants du retour d'expérience, notamment ceux liés aux incendies, aux explosions et aux éboulements.

Tableau 10. Accidents les plus meurtriers

Rang	Année	Pays/mine	Nature de l'accident	Code	Décès
1	1968	États-Unis - Belle Isle	Incendie dans une mine de sel souterraine	FES	21
2	1875	Pologne - Bochnia	Incendie dans la chambre Beust	FES	12
3	1920	États-Unis - Jefferson Island No. 3 Shaft	Explosion de gaz	EXP	6
4	1979	États-Unis - Belle Isle	Explosion dans une mine de sel	EXP	5
5	1970	États-Unis - Jefferson Island	Éboulement / chute de toit	EBO	4
6	1975	États-Unis - Retsof Sterling B	Explosion de gaz en galerie	EXP	4
7	1917	États-Unis - Fairport	Explosion de gaz en mine	EXP	2
8	2001	États-Unis - Hutchinson	Explosion de gaz - stockage / cavités	EXP	2
9	2020	États-Unis - Avery Island	Chute de toit / éboulement	EBO	2
10	1995	États-Unis - Côte Blanche	Accident d'engin / manutention	OUV	1

Le Tableau 11 compare les épisodes rattachés à l'exploitation active ou assimilée à ceux relevant de la post-exploitation, du post-minier ou du stockage. Cette distinction éclaire le poids relatif de la mortalité directe et les limites d'une lecture fondée uniquement sur les décès.

Tableau 11. Exploitation active, post-exploitation et stockage

Indicateur	Exploitation active	Post-exploitation / stockage	Commentaire
Nombre d'épisodes	31	4	Effectif post-exploitation faible ; interprétation indicative.
Décès totaux	64	2	Les effets des coûts et des dommages territoriaux ne se reflètent pas dans la mortalité directe.
Sévérité moyenne	2,06	0,50	À ne pas interpréter comme un risque unitaire.
Part des épisodes sans décès	48 %	75 %	Conséquences non létales potentiellement majeures.
Aléas dominants	IBE, OUV, EXP, EBO	SUB, EFG, EXP selon cas	Statut parfois interprétatif selon les sources.

La Figure 9 compare les épisodes et décès entre l'exploitation active ou assimilée et la post-exploitation / le stockage. Elle rappelle que les conséquences post-exploitation peuvent être majeures même lorsque la mortalité directe est faible.

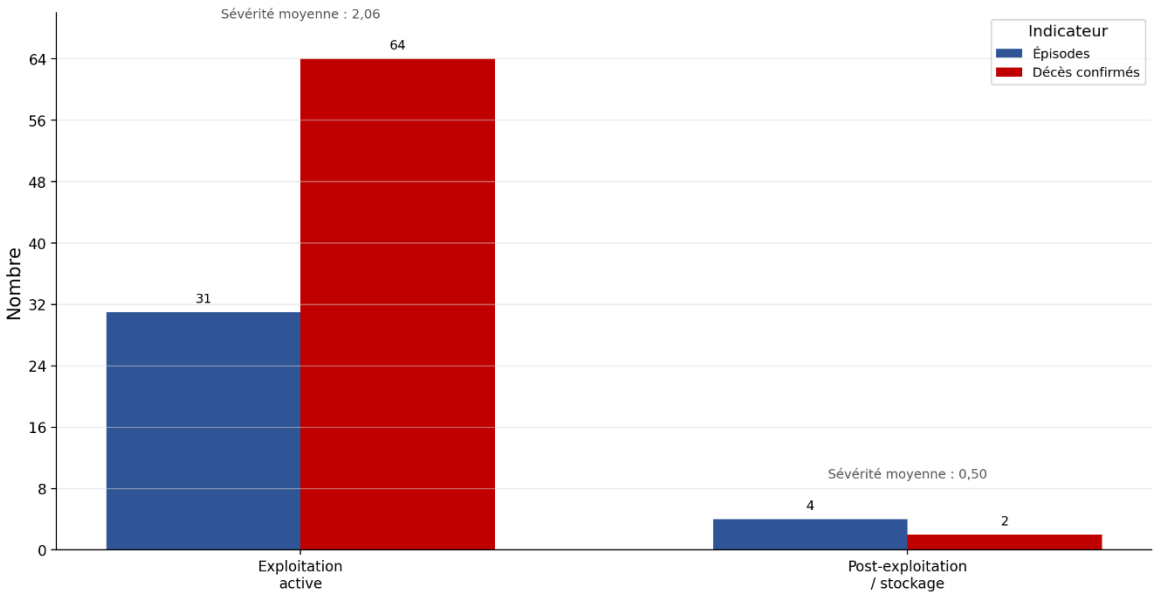


Figure 9. Exploitation active et post-exploitation / stockage. Le regroupement « exploitation active et assimilée » inclut les phases « exploitation / tourisme » et « exploitation / aléa de surface ».

Le Tableau 12 propose une comparaison indicative entre la base consolidée sel gemme (NaCl) et une base potasse (KCl) non consolidée au même niveau. Cette comparaison doit être lue comme un signal d'orientation pour une extension méthodologique, et non comme une mesure définitive.

Tableau 12. Potasse : comparaison indicative hors base NaCl

Indicateur	Sel gemme (NaCl)	Potasse (KCl) - indicatif	Lecture
Nombre d'épisodes recensés	35	62	Comparaison indicative, base potasse non consolidée au même niveau.
Décès totaux	66	141	Signal d'orientation, non-mesure définitive.
Sévérité moyenne	1,89	2,27	Écart à confirmer après dédoublonnage et qualification des sources.
Aléa fréquent	IBE	EXP	Différences plausibles liées aux gaz et aux profondeurs.
Aléa meurtrier	FES	EXP	À confirmer par la base KCl consolidée.

La Figure 10 illustre la comparaison indicative entre sel gemme et potasse. Elle est présentée ici, uniquement pour motiver une extension méthodologique, la base KCl n'étant pas consolidée au même niveau que la base NaCl.

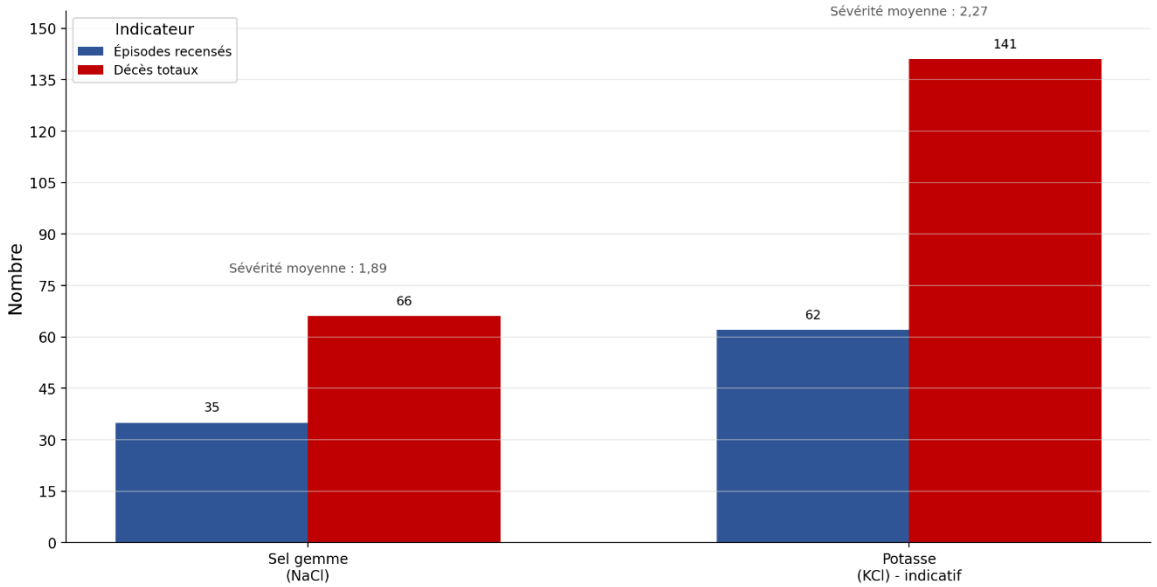


Figure 10. Comparaison indicative sel gemme (NaCl) / potasse (KCl). La comparaison avec KCl est indicative et hors de la base NaCl consolidée ; elle ne vaut pas de mesure définitive.

Le Tableau 13 synthétise les principaux messages utiles à la décision publique. Il met en relation des constats quantitatifs, une lecture qualitative et des actions recommandées, sans constituer une cotation réglementaire automatique.

Tableau 13. Tableau de bord décisionnel

Indicateur	Valeur / constat	Lecture qualitative	Action recommandée
Coûts de remédiation Asse II / Morsleben	Asse II : env. 4,7 Md€ avant récupération ; Morsleben : 163 M€ de stabilisation achevée en 2011.	Enjeu financier majeur	Garanties financières et doctrine de proportionnalité.
Décès recensés depuis 1990	12	Mortalité récente réduite mais non nulle	Maintien du REX et des prescriptions de sécurité.
Épisodes post-exploitation / stockage	4 / 35	Effectif faible, conséquences potentielles élevées	Cadre spécifique post-exploitation.
Part des ennoyages sans décès direct	31,4 % des épisodes ; 0 décès direct documenté	Vigilance hydrogéologique	Monitoring continu et seuils d'alerte.
Létalité des incendies	16,5 décès par épisode FES	Scénario très létal	Prescriptions incendie renforcées.
Normalisation du risque par production	Non robuste sur 1864-2025	Incertitude méthodologique	Construire un indicateur par Mt sur une période récente.
Données pré-1950	Blessés et dommages sous-documentés	Incertitude documentaire	Chantier d'archivage et de validation de sources.

Note : les lectures qualitatives du tableau de bord ne constituent pas une cotation réglementaire. Elles hiérarchisent des priorités internes selon la fréquence, la gravité, les coûts, l'incertitude et le potentiel de dommage.

Le Tableau 14 précise le périmètre, les sources et les limites de la base de référence. Il explicite les principaux choix de consolidation et rappelle les précautions nécessaires lors de l'interprétation des résultats.

Tableau 14. Note méthodologique

Rubrique	Méthode / limite
Périmètre	46 enregistrements bruts audités : 35 épisodes accidentels dans des mines souterraines de sel gemme (NaCl), avec distinction entre l'exploitation, la post-exploitation et le stockage, lorsque possible.

Rubrique	Méthode / limite
Couverture géographique	7 pays : France, Allemagne, Pologne, Roumanie, États-Unis, Canada, Brésil.
Sources principales	USGS, MSHA, KGS, BGE, BGR, SALROM, Braskem, littérature scientifique, presse recoupée, sources internes Ineris.
Classification des aléas	Lecture prioritaire par code d'aléa primaire ; codes secondaires conservés pour la traçabilité.
Limites	Sous-représentation probable des pays non anglophones, données anciennes et lacunaires, normalisation par la production non robuste, distinction entre exploitation et post-exploitation parfois interprétative.
Prochaine mise à jour	Consolidation recommandée au T4 2026, incluant la vérification des cas de 2025, ainsi que le statut public de certaines références et indicateurs par production au cours des décennies récentes.

Institut national de l'environnement industriel et des risques
Parc technologique Alata • BP 2 • F-60550 Verneuil-en-Halatte
03 44 55 66 77 • ineris@ineris.fr • www.ineris.fr