

# Sommaire et conclusion

Traduction française adaptée de :

## The long term stabilization of uranium mill tailings

Final report of a co-ordinated research project 2000-2004

International Atomic Energy Agency (2004)

IAEA-TECDOC-1403

<http://www-pub.iaea.org/books/IAEABooks/7054/The-Long-Term-Stabilization-of-Uranium-Mill-Tailings>

### Mise en garde

*Cette traduction n'a pas été faite par l'Agence internationale de l'énergie atomique. La version authentique est la version anglaise distribuée par l'AIEA, ou en son nom par des personnes dûment autorisées. L'AIEA ne donne aucune garantie et n'assume aucune responsabilité en ce qui concerne la précision, la qualité, l'authenticité ou l'exécution de la traduction et de sa publication et n'accepte aucune responsabilité pour toute perte ou tout dommage, consécutif ou autre, découlant directement ou indirectement de l'utilisation de cette traduction.*

## 9. SOMMAIRE

### 9.1. Pratiques historiques

Les résidus des usines de concentration d'uranium des années 1950 et 1960 étaient considérés comme très similaires aux autres résidus miniers non radioactifs en fait de risque potentiel. L'utilisation des résidus d'uranium en tant que matériaux de construction dans plusieurs endroits situés près des mines d'uranium et des usines de concentration d'uranium démontre bien le faible niveau de connaissances qui prévalait généralement en matière d'effets radiologiques. Par souci de commodité et d'économie, les résidus étaient placés dans le réceptacle le plus proche, généralement une dépression naturelle ou un lac, s'il s'en trouvait à proximité. Sinon, la pratique consistait à construire un remblai ou une digue dans une vallée, ou à la base de versants en pente douce. En l'absence de dépressions ou de pentes, et sous les climats secs, les résidus étaient parfois étalés sur des terrains plats ou encore, entourés d'une digue circulaire dans les régions plus humides. Toutefois, on se souciait peu d'empêcher l'eau ayant été en contact avec les résidus d'atteindre les cours d'eau. On ne se préoccupait pas non plus de la dispersion des résidus sous forme de poussières. Généralement, aucune mesure n'était prise pour restaurer les milieux touchés par une rupture du confinement, pas plus qu'on ne récupérait les résidus dispersés pour les retourner dans le lieu de confinement.

Les pratiques de confinement ont commencé à s'améliorer au milieu des années 1960, alors que des ouvrages de retenue plus imposants ont été construits, plus particulièrement aux emplacements des nouvelles mines et usines de concentration d'uranium où une meilleure conception des parcs à résidus a été incorporée aux plans de gestion. Citons en exemple la méthode de construction vers l'amont par laquelle des résidus projetés par cyclonage sont utilisés pour rehausser la digue. Toutefois, des pratiques inappropriées de disposition des résidus ont perduré sur certains sites jusque dans les années 1970 et au-delà, particulièrement dans des pays où la production d'uranium faisait l'objet d'un strict secret d'état.

Certaines des options de gestion des résidus que nous pourrions considérer appropriées aujourd'hui ont été utilisées historiquement, mais ont été davantage le fait de coïncidences que de décisions éclairées. Le remplissage de mines à ciel ouvert en est un exemple. Toutefois, peu de modifications étaient apportées pour limiter le potentiel de contamination des eaux de surface et des eaux souterraines. En général, on ne tenait pas compte des différentes situations climatiques dans lesquelles les résidus étaient entreposés ni des différents niveaux de risque associés à la défaillance des ouvrages de confinement ni des conséquences sur la santé humaine ou sur l'environnement. Cette négligence était basée sur l'ignorance des risques et dangers. C'est avec l'évolution des connaissances sur les effets du rayonnement sur le corps humain que l'on a acquis une meilleure compréhension de ces risques et dangers. Une législation dont le but était essentiellement de protéger la santé des travailleurs a été développée à partir des années 1940. Mais ce n'est pas avant le milieu des années 1960 qu'on a commencé à se préoccuper des impacts sur la communauté en général et sur l'environnement, ce qui a mené à un changement majeur dans la façon dont les risques et les dangers liés aux

résidus du traitement de l'uranium ont été perçus, y compris leur caractère à long terme. À partir de ce moment, un changement majeur est survenu dans la façon de concevoir le confinement des résidus. Une nouvelle approche s'est développée progressivement. Celle-ci prend en compte des enjeux comme le climat, les possibles causes de rupture des ouvrages de confinement, le confinement à long terme, de même que les valeurs et les sensibilités du milieu environnant dans le but de réduire le risque de rupture du confinement et les dangers potentiels pour l'environnement.

## **9.2. Impacts sur l'environnement**

Les pratiques inefficaces de confinement et de gestion des résidus dans le passé ont largement contribué à l'héritage négatif laissé par l'exploitation de l'uranium. Les dangers spécifiques liés aux résidus de concentration de l'uranium n'étaient pas connus et ces derniers étaient traités de la même manière que les résidus des autres types de minerais. La pratique courante consistait à gérer des résidus de la façon la plus économique et pratique possible – dans les dépressions topographiques pour contenir les résidus et les effluents liquides sous les climats humides (les dépressions naturelles pouvaient être des vallées, des lacs, etc.), ou de les empiler sur un terrain plat sous les climats plus secs. Le principal vecteur de contamination dans les régions plus humides est l'érosion par l'eau, menant à la contamination des cours d'eau et des lacs, alors que dans les régions sèches, le principal vecteur est la poussière. Parmi les contaminants, on retrouvait tant des matériaux radioactifs que des métaux toxiques et d'autres composés chimiques, souvent accompagnés d'acidité et de salinité.

Comme c'était généralement le cas dans l'industrie minière au cours des 60 premières années du siècle dernier, il y avait peu ou pas d'entretien des sites de résidus; par exemple, si des clôtures avaient été prévues, elles n'étaient pas réparées ou remplacées en cas de bris ou de vols et il n'y avait pas de restrictions rigoureuses à l'accès et à la réutilisation des résidus.

Divers impacts sur la santé et sur l'environnement se sont produits dans les circonstances suivantes :

- La rupture ou l'effondrement catastrophique de l'ouvrage de confinement, dans certains cas causant la mort;
- L'accès public non contrôlé aux résidus et leur réutilisation inappropriée, menant à une augmentation des doses de rayonnement et à des risques de cancer;
- Le débordement ou l'infiltration d'effluents liquides dans les eaux de surface, causant contamination et impacts écosystémiques dans les cours d'eau et les lacs;
- L'infiltration dans les eaux de surface et souterraines, menant à la contamination des ressources en eau importantes pour la consommation humaine, l'irrigation, les équipements collectifs et le tourisme.

Le fait de reconnaître l'exposition à la radioactivité résultant de l'utilisation de résidus comme matériaux de construction aux États-Unis, – principalement comme granulats pour le béton et comme remblai – a contribué à une meilleure compréhension du niveau de risque que les résidus posaient pour la santé humaine. Par la suite, les premières réglementations s'appliquant spécifiquement aux résidus de concentration de l'uranium ont été mises en place. La conscience des risques pour l'environnement s'est développée plus tard, lorsqu'on a soupçonné que l'assimilation et la bioaccumulation dans la chaîne alimentaire, pouvaient augmenter la dose totale chez les humains.

On a utilisé l'humain comme une espèce indicatrice afin de déterminer un taux de dose radiologique sécuritaire pour toutes les espèces. Cela constitue une approximation utile pour établir les normes de protection de l'environnement contre les risques des radiations ionisantes. Toutefois, les risques à long terme de l'exposition chronique ne sont pas bien compris, particulièrement en ce qui a trait aux effets potentiels à long terme (c'est-à-dire génétiques) sur les populations, la densité, les dynamiques écosystémiques et la biodiversité. Un nouveau champ d'études se développe sur les risques et les effets liés à la fabrication de combustible nucléaire, à la production d'énergie et à la gestion du combustible irradié. Il reste encore à s'attaquer adéquatement aux risques provenant des faibles niveaux de radioactivité des parcs à résidus.

Les résidus de concentration de l'uranium constituent un cocktail de composants potentiellement toxiques, dont certains sont connus pour être considérablement plus toxiques que les minéraux radioactifs. Tant pour l'analyse des impacts du passé que dans la planification d'une meilleure gestion pour le futur, il faut désormais prendre en considération la chaîne complète des substances toxiques présentes dans les résidus d'uranium.

### **9.3. Programmes de restauration**

La restauration des parcs à résidus de concentration de l'uranium a été entreprise et progresse dans presque tous les pays où l'uranium a été ou est actuellement exploité. Les premières tentatives de restauration ont connu un succès variable. Les évaluations de leur efficacité sont peu nombreuses et généralement limitées en fait d'informations quantitatives et comparables. Même avec la planification la plus rigoureuse, il demeure possible de négliger des préoccupations importantes. À mesure que s'accroissent les connaissances sur la sensibilité environnementale et que la réglementation et les normes évoluent en conséquence et en réponse aux préoccupations du public, les normes de restauration des sites deviendront plus exigeantes.

On apprend beaucoup des programmes de restauration, au fur et à mesure de leur réalisation, puis ultérieurement grâce aux résultats de suivi. Ce qui ressort distinctement du travail fait à ce jour est qu'il n'y a pas de solution unique idéale. Chaque site doit être soigneusement étudié afin de d'établir l'approche qui lui conviendra le mieux. La quantité et le type de travail, ainsi que les coûts associés, pourront différer nettement d'un site à l'autre. Les raccourcis mèneront probablement à ce qu'une partie du travail devra être reprise. Les conceptions et méthodes de construction qui s'harmonisent avec le milieu

naturel et s'en inspirent sont préférables aux concepts d'ingénierie conçus pour résister. Il vaut mieux mettre à profit les processus naturels pour viser la stabilité à long terme.

La restauration de milieux ayant subi l'impact environnemental d'anciennes mines s'est avéré un défi technologique et économique difficile à relever. Même le programme bien financé *Uranium Mill Tailings Remediation Action Programme* (UMTRA) aux États-Unis a mis presque vingt ans à être entrepris (Annexe XIII). Les efforts et les coûts de restauration sont plus élevés quand la planification et les étapes de préparation de la fermeture et la restauration ne sont pas constamment intégrées à l'exploitation de la mine et du parc à résidus. Quand l'exploitation minière de l'uranium est entreprise par le secteur privé, il est possible d'élaborer et d'imposer une réglementation qui assure une planification et un financement adéquats pour la restauration, et ce, afin de réduire ou d'éliminer le risque que ces obligations soient transférées au gouvernement. Quand l'exploitation de l'uranium est assurée par les institutions de l'État, des mesures similaires peuvent être prises pour s'assurer que la planification et la mise en œuvre des activités de restauration soient bien sous la responsabilité des exploitants. Le financement est normalement encadré par des programmes approuvés et il est assujéti à une vérification exhaustive.

#### **9.4. Pratiques actuelles**

En général, les technologies utilisées par l'industrie minière pour les résidus d'uranium ne sont pas différentes de celles utilisées pour les autres résidus miniers. La plupart des problèmes environnementaux engendrés par les résidus d'uranium sont similaires à ceux rencontrés dans les autres mines et usines de concentration. En fait, une part importante du risque environnemental lié aux résidus de concentration de l'uranium peut venir des contaminants non radioactifs. Par conséquent, les approches développées pour les autres types de minerais peuvent généralement être appliquées aux résidus de concentration de l'uranium. On peut retrouver dans l'industrie minière de l'uranium des exemples de la plupart des types de confinement et leur méthode de construction. Pour les parcs à résidus créés au cours des vingt-cinq dernières années, l'information détaillée est publique et facilement accessible.

Le type de confinement des résidus est étroitement lié aux caractéristiques des sites de la mine et de l'usine de concentration. Les principaux critères pour sélectionner les pratiques les plus appropriées sont d'ordre technique, environnemental, économique et sociétal. Alors que les options techniques pour le confinement des résidus sont nombreuses, c'est la nature du site qui détermine généralement le type de confinement utilisé. Ce que l'on peut considérer comme le type de confinement le meilleur ou le plus économique différera d'un site à l'autre, en fonction du climat, du type de minerai et de résidus, du volume, de la sismicité, de l'éloignement, du transport et de la logistique disponibles, ainsi que de la disponibilité de dépressions naturelles ou construites. Une analyse approfondie s'impose sur chaque site pour s'assurer de choisir l'option la plus appropriée.

Des ruptures de digues de retenue des parcs à résidus sont survenues dans le passé, mais leur occurrence et leur fréquence ne sont pas facilement corrélées avec certains types de digues ou de méthodes de construction. Des données statistiques révèlent que la plupart des défaillances sont reliées à la saturation, à la liquéfaction et aux caractéristiques rhéologiques des résidus humides retenus par les digues, et que le risque est beaucoup plus élevé durant la phase d'exploitation. De toute évidence, la gestion de l'eau est un enjeu crucial pour la réduction du risque. Les digues peuvent se rompre après la fermeture, principalement en raison d'un tremblement de terre, de facteurs géotechniques ou à la suite d'une inondation. Souvent, l'insuffisance ou l'absence d'entretien est à l'origine de ces défaillances. Par conséquent, les plans de fermeture devraient accorder une attention particulière à la réduction de ces risques. Il existe une grande quantité d'information sur les défaillances des digues des parcs à résidus autres que ceux de l'industrie de l'uranium. Cette information est tout à fait applicable à la gestion des résidus de concentration de l'uranium.

Les types de confinement sans digues qui utilisent des dépressions naturelles comme les lacs, ou des cavités artificielles, comme les galeries de mines désaffectées ou d'anciennes mines à ciel ouvert, offrent certains avantages en raison de leur stabilité physique inhérente post-fermeture (Annexe XII). Les risques associés aux tremblements de terre et aux débordements s'en trouvent en grande partie éliminés. La contamination des eaux souterraines demeure le principal mécanisme de pollution de ces types de confinement souterrains.

Les méthodes disponibles pour réduire le risque de pollution à partir des confinements incluent la réduction à la source du potentiel de contamination par le conditionnement et le traitement des résidus (Annexes II et VI), l'isolement de l'environnement à l'aide de recouvrements et de scellements, de même que le traitement actif et passif de l'effluent. Dans certains cas, la relocalisation peut s'avérer la mesure corrective la plus appropriée, particulièrement si les résidus sont situés à proximité de zones habitées.

Il existe un corpus important de travaux consacrés à la conception des recouvrements. La conception et la construction du recouvrement doivent être adaptés à chaque emplacement et prendre en compte le climat local, la disponibilité des matériaux de construction, la nature des bassins de confinement, les contraintes réglementaires, de même que les attentes de la communauté locale et l'acceptabilité sociale. Bien qu'une information propre à chaque emplacement soit requise, il est probable que des recherches sur la conception se répètent inutilement d'un pays à l'autre. Il semble qu'il soit temps de grouper ce vaste ensemble de travaux de manière à ce qu'il soit facilement disponible et compréhensible par tous. Néanmoins, la non disponibilité locale de matériaux de construction privilégiés (comme l'argile pour le recouvrement) ainsi que des ressources financières limitées pour se procurer ces matériaux sur le marché, peuvent, dans certains pays, contraindre à concevoir des solutions locales (voir l'Annexe III-Chine par exemple).

La recherche spécifique aux parcs à résidus uranifères va plus loin que la recherche sur les méthodes de confinement des autres types résidus miniers en raison de l'importance accordée aux problèmes de la radioactivité et à leur longévité (particulièrement les émanations de radon). Des domaines spécifiques de recherche sur la longévité incluent les changements climatiques et la variabilité du climat, l'érosion, la stabilité géotechnique à long terme, les suivis ainsi que le développement et le calibrage de modèles pour le long terme.

Toutefois, les résidus non uranifères posent également des risques à long terme, en raison notamment de la production de drainage minier acide [202]. Il pourrait être avantageux que la recherche sur la gestion des résidus d'uranium s'alimente d'autres recherches, comme celles sur les résidus miniers non uranifères, et vice-versa. Pareillement, on pourrait mener des recherches conjointes sur les enjeux communs, comme la durée des performances chimiques et physiques des confinements.

En résumé, on a réalisé des progrès considérables au cours des 20 à 30 dernières années dans le développement de méthodes de confinement sécuritaires pour les résidus de concentration de l'uranium.

### **9.5. Questions en suspens**

En ce qui a trait à la stabilisation et à l'isolement des résidus de concentration de l'uranium, la sécurité du confinement à long terme, la prévention des fuites et la mobilité chimique des contaminants à court et à long terme demeurent des problèmes à résoudre. Un nouveau concept se développe qui prône le mimétisme ou le recours à des processus naturels afin d'améliorer la stabilité physique et chimique par le développement de connaissances sur l'assimilation et l'atténuation naturelles (conception écologique). Cela pourrait mener à un changement fondamental dans la conception des ouvrages de confinement. En s'écartant de structures conçues pour séquestrer leur contenu hors de tout contact avec l'environnement, on se dirige plutôt vers des structures qui utiliseraient les processus naturels pour fondre sur le long terme la structure entière et son contenu dans le milieu environnant.

### **9.6. Nouvelles approches**

Une pause dans les recherches est survenue dans les années 1990, à la suite de la conclusion d'une bonne partie des projets entrepris en Amérique du Nord dans le cadre des programmes *US Uranium Mill Tailings Remediation Action Programme* et *Canadian National Uranium Tailings Programme*. Les résultats obtenus par ces programmes et les leçons qu'on en a tirées sont toujours pertinents aujourd'hui. Ils constituent la base de la recherche fondamentale sur la conception et la planification des travaux de restauration actuels dans d'autres pays. Toutefois, les résultats des travaux antérieurs ne sont pas toujours facilement accessibles et une évaluation critique exhaustive serait nécessaire afin que de précieux fonds de recherche ne soient pas dilapidés dans la répétition inutile de projets.

L'axe principal de la recherche porte actuellement sur les méthodes de stabilisation des résidus (Annexes II, VI, IX, et X). Si au cours des pages précédentes, on tentait de répartir les travaux entre les thèmes de la stabilisation physique, de la stabilisation chimique des piles de résidus et de la stabilisation des recouvrements, on constate qu'une large part des travaux recoupe ces trois domaines. La majorité des travaux porte en effet sur les façons de « cimenter » les résidus avec des agents capables d'absorber ou de co-précipiter les contaminants (avec une attention particulière aux métaux) sous l'effet de réactions d'oxydoréduction et de modifications du pH. Par conséquent, la stabilité chimique et la stabilité physique découlent du même processus. Ces agents sont soit des ciments Portland éprouvés, d'autres réactifs organiques ou inorganiques ou encore des polymères de haute technologie (Annexe XI). Certains exploitent et améliorent les processus diagénétiques naturels, d'autres n'en tiennent pas compte.

Il en résulte un impressionnant corpus de travaux se prêtant à d'intéressantes applications dans le domaine de l'isolement et de la stabilisation des résidus de concentration de l'uranium, tant à l'étape de la mise en place, que durant les phases non opérationnelles de pré-fermeture, qu'en préparation de la restauration, durant la restauration ou après coup. Toutefois, la plupart ne sont pas suffisamment avancés et éprouvés pour permettre d'en évaluer les avantages potentiels, les coûts et les exigences. De plus, les techniques qui ont été mises au point et implantées avec succès pour les résidus miniers non uranifères n'ont pas été suffisamment testées sur les résidus d'uranium. Leur pertinence n'est pas encore clairement établie. C'est le cas des techniques d'atténuation du drainage acide qui réduiraient également la mobilité de l'uranium dans les résidus acides/sulfurés, ou des technologies d'épaississement et d'assèchement des résidus.

Le besoin d'un confinement de haute sécurité des résidus pour des périodes de temps de l'ordre de milliers d'années est propre à l'industrie de l'uranium, même si on sait maintenant que les haldes de résidus sulfurés occasionnent des risques environnementaux pouvant perdurer jusqu'à mille ans. On constate un intérêt grandissant pour une nouvelle approche qui consiste à concevoir la fermeture d'une mine en fonction d'un horizon de temps infini, de préférence aux approches basées sur des plans à durée de vie limitée menant à de probables défaillances dans l'avenir. Dans un même ordre d'idées, la nature dispose de différents mécanismes pour aider à la stabilisation des contaminants. Ces mécanismes suscitent d'ailleurs un vif intérêt et d'importants efforts en recherche y sont consacrés. Il s'agit de maximiser le potentiel de ces mécanismes naturels dans le but de développer de meilleurs systèmes « passifs » et de réduire les risques de défaillance inhérents aux systèmes interventionnistes.

Une nouvelle génération de techniques de stabilisation basées sur des polymères de pointe et sur une chimie organique complexe se développe (Annexe IX). Celles-ci promettent, tant durant l'exploitation qu'après l'arrêt des opérations, des méthodes plus efficaces et plus durables de stabilisation que celles fondées sur la technologie de la pâte de ciment Portland. Ce champ de recherche en plein essor s'appuie surtout sur des essais en laboratoire et assez peu sur des vérifications de terrain. L'applicabilité de ces techniques sur le terrain demeure méconnue.

## 9.7. Évaluation de la performance

L'évaluation de la performance inclut normalement la vérification de la conformité à la réglementation en vigueur, de même que la vérification de l'atteinte d'objectifs de performance spécifiques au site. Une évaluation de la performance constitue également un outil d'optimisation des mesures de restauration et un outil d'identification de lacunes dans la conception, dans les procédures opérationnelles et dans les systèmes de gestion. Ces évaluations portent aussi bien sur les aspects géotechniques que radiologiques et non radiologiques.

Étant donné que la conception et l'exploitation de plusieurs installations de traitement des résidus s'appuient sur des hypothèses et des modèles, l'évaluation de la performance fournit une information utile à la vérification et à l'étalonnage de ces hypothèses et modèles (Annexes I et V). Les priorités à venir en recherche et développement pourraient découler des déficiences des plans ou des systèmes ainsi évalués.

L'évaluation axée sur le risque et l'évaluation basée sur la conception constituent les deux approches de base. En pratique, l'approche adoptée pour une évaluation de la performance dépendra du point de départ conceptuel, de paramètres spécifiques au site ainsi que d'éventuelles exigences des autorités responsables.

Une évaluation de la performance devrait inclure divers éléments, dont l'état de référence du site, un suivi de performance à court terme, ainsi qu'une modélisation prédictive de performance à moyen et à long terme. Le volet radiologique de l'évaluation devrait être mené selon les divers scénarios d'exposition développés et en fonction des doses que recevraient des groupes critiques spécifiques. L'évaluation des effets non radiologiques est habituellement menée en fonction des valeurs cibles normatives, telles que les concentrations de contaminants autorisées dans certains milieux récepteurs. Il existe un ensemble bien établi de normes et critères visant les risques technologiques prévisibles.

## 10. CONCLUSIONS

On constate que les technologies de gestion des résidus de concentration de l'uranium ont atteint une certaine maturité. Il reste toutefois un certain nombre d'incertitudes concernant la performance à long terme des ouvrages de retenue. Une telle incertitude n'est pas propre aux ouvrages de retenue de résidus, mais inhérente à toutes les constructions humaines à la surface de la terre. La stabilité à long terme des installations souterraines de stockage semble être plus prévisible.

Les incertitudes découlent largement de la conception de base, au regard notamment de l'évolution à long terme des paramètres climatologiques ou encore d'événements aléatoires, comme les scénarios d'intrusion humaine. Le présent document analyse différentes stratégies pour contrer ces incertitudes, mais il met l'accent sur les solutions techniques.

Les résidus eux-mêmes posent des défis majeurs de stabilité à long terme, tant pour les structures de confinement que pour le contrôle des fuites de contaminants. Bien que l'assèchement des résidus représente un effort technologique majeur, mais on dispose pour les résidus récents, des technologies éprouvées comme celle du remblai en pâte. La situation est différente dans le cas de parcs à résidus plus anciens. Les procédés de consolidation et de solidification sont encore à l'étape du développement et le présent document traite de quelques exemples prometteurs. Ces procédés de solidification contribueront également à réduire à la source la mobilité des contaminants en cas de rupture des structures de confinement.

Le succès de la stabilisation des parcs à résidus anciens est confronté à un lot de défis changeants: par exemple l'érosion par le vent et par l'eau qui survient avant qu'un recouvrement définitif ne soit mis en place. Le présent rapport décrit des méthodes pour réduire les effets de l'érosion.

Puisque les solutions techniques seules sont vraisemblablement insuffisantes pour assurer la stabilité à long terme, une certaine forme de contrôle institutionnel peut s'avérer nécessaire. Le présent document démontre l'utilité d'une approche intégrée comportant une analyse de risque, des mesures techniques, des règles de gestion, de même que la participation des parties prenantes.