

Stockage des déchets nucléaires

WILDI, Walter

Abstract

La Suisse a décidé de ne pas renouveler ses centrales nucléaires actuellement exploitées. Toutefois, la fin du cycle industriel nucléaire (ou : « sortie du nucléaire ») ne sera atteinte que lorsque la question du stockage sûr et durable des déchets provenant de l'exploitation et du démantèlement des centrales aura trouvé une solution durable. C'est la solution du stockage géologique en profondeurs dans la lithosphère des continents selon le principe des barrières multiples qui a la plus grande reconnaissance internationale. En Suisse la recherche de sites de stockage pour déchets de faible à moyenne radioactivité d'une part, et pour déchets hautement radioactifs d'autre part, est organisée dans le cadre du plan sectoriel "dépôts en couches géologiques profondes". Une estimation des dangers liés à ce projet fait ressortir un manque d'analyse et un potentiel de risque significatif pendant la phase d'exploitation des sites, d'une durée d'environ 150 à 200 ans, avec des installations d'accès et de stockage partiellement ouvertes qui présentent en particulier un risque de [...]

Reference

WILDI, Walter. Stockage des déchets nucléaires. *Aqua and Gas*, 2013, vol. 2013, no. 4, p. 76-81

Available at:

<http://archive-ouverte.unige.ch/unige:27496>

Disclaimer: layout of this document may differ from the published version.



UNIVERSITÉ
DE GENÈVE

STOCKAGE DES DÉCHETS NUCLÉAIRES

RISQUES ENVIRONNEMENTAUX LIÉS AUX DÉPÔTS GEOLOGIQUES PROFONDS EN SUISSE

La Suisse recherche un ou deux sites pour l'établissement de dépôts géologiques profonds pour le stockage des déchets nucléaires de faible et moyenne et de haute radioactivité. Le choix des sites et la conception de ces installations vont déterminer le niveau de sécurité, en particulier pour la qualité des eaux souterraines. Une attention particulière doit être prêtée à la phase d'exploitation, quand les installations peuvent être menacées d'infiltration d'eau, ou d'inondation en cas d'incident.

Walter Wildi, Institut F.A. Forel et Institut des sciences de l'environnement, Université de Genève*

ZUSAMMENFASSUNG

UMWELTRISIKEN, DIE VON DER LAGERUNG RADIOAKTIVER ABFÄLLE AUSGEHEN

Die Schweiz hat beschlossen, ihre auslaufenden Kernkraftwerke nicht mehr zu erneuern. Allerdings wird das Ende des industriellen Zyklus der Kernkraftwerke erst dann erreicht sein, wenn die radioaktiven Abfälle aus Betrieb und Abbruch der Werke sicher entsorgt sind. Die international am weitesten anerkannte Lösung zur nuklearen Entsorgung ist die Lagerung der Abfälle in einem geologischen Tiefenlager nach dem Multibarrieren-Prinzip. In der Schweiz wird die Suche nach Lagerstandorten für schwach- und mittelaktive Abfälle einerseits und für hoch radioaktive Abfälle andererseits im Rahmen des «Sachplans geologische Tiefenlager» durchgeführt. Eine Risikoabschätzung zum laufenden Projekt zeigt, dass vor allem der Betriebsphase bis jetzt zu wenig Beachtung geschenkt wurde. Während dieser Phase, die etwa 150 bis 200 Jahre dauert, sind die Lageranlagen teilweise offen. Daher sind sie der Gefahr eines Wasserzuflusses durch Infiltration oder gar eines massiven Wassereintruchs in der Folge eines Störfalles ausgesetzt. Eine Überschwemmung der Lagerinstallationen im Opalinuston, dem Wirtgestein des Lagers, könnte zu Grundwasserverschmutzungen und zu einer Beschädigung oder gar zum Einsturz der Anlagen führen. Den Risiken einer Wasserverschmutzung, wie auch den Risiken, die den Installationen durch Infiltration oder Einbruch von Wasser entstehen können, muss sowohl bei der Konzipierung als auch bei der Standortwahl für Oberflächen- und

INTRODUCTION

Les rayonnements ionisants affectent les organismes vivants. Ils peuvent endommager les molécules d'ADN (acide désoxyribonucléique) responsables de la reproduction cellulaire, et provoquer le développement de cancers. Ce rayonnement peut atteindre les organismes, et en particulier l'homme, soit par exposition extérieure, soit par ingestion de particules radioactives (nourriture, boissons), ou encore par inhalation de poussières, aérosols ou gaz radioactifs. La question de la protection de l'homme de ces rayonnements est venue sur le devant de la scène avec le développement de l'industrie nucléaire après la seconde guerre mondiale, et l'élimination des déchets radioactifs issus de l'exploitation des centrales nucléaires a été débattu à l'échelle internationale dès la conférence de 1955 «l'atome pour la paix», à Genève.

Des déchets nucléaires suisses et européens ont été immergés à partir du milieu du 20^e siècle dans les zones abyssales de l'Atlantique Nord. Cette pratique a cependant été arrêtée dans le cadre d'un moratoire en 1982 [1], après la découverte de contaminations radioactives en mer, et bannie par la Convention de Londres en 1993. Parmi les modèles de gestion des déchets nucléaires débattus depuis lors, on peut mentionner à titre d'exemple: La transformation (transmutation) des combustibles irradiés, permettant de réduire l'activité et la durée

* Kontakt: walter.wildi@unige.ch

de vie des déchets, l'enfouissement dans les sédiments océaniques des plaines abyssales ou dans les glaces des calottes du Groenland ou de l'Antarctique, l'envoi des déchets dans l'espace, ou encore la surveillance des déchets dans des sites de stockage en surface (concept du «gardiennage»). Toutes ces options se sont heurtées à un moment ou un autre à des considérations de risque et ont été abandonnées [2].

Depuis la fin des années 1970 le «stockage final» des déchets radioactifs dans un dépôt géologique continental selon un concept de protection de la biosphère par des barrières multiples s'est imposé à l'échelle globale [3]. Suivant ce concept, des mesures de gestion, des barrières techniques (forme physique et chimique des déchets, matrice éventuelle, emballage, remplissage des cavernes de stockage) et des barrières naturelles (roche d'accueil, environnement géologique continental) protègent la biosphère d'une contamination radioactive pendant le temps nécessaire à une désintégration suffisante des radioisotopes jusqu'à une valeur tolérée (fig. 1).

On estime qu'après 50 ans d'exploitation de ses cinq réacteurs nucléaires commerciaux, et en tenant compte du démantèlement de ces installations, la Suisse aura à éliminer un volume d'environ 100 000 m³ de déchets nucléaires, soit 7300 m³ de déchets hautement actifs et de barres de combustibles activées (DHA ou HAA), 60 000 m³ de déchets de faible et moyenne radioactivité provenant de l'exploitation et du démantèlement des centrales et autres installations nucléaires (ex. site de stockage intermédiaire ZWILAG) et 30 000 m³ de déchets de moyenne et faible radioactivité (DFMA ou SMA) provenant de la recherche, de l'industrie et de la médecine. D'après la loi, les sociétés exploitantes des centrales nucléaires sont responsables de l'élimination des deux premières catégories (LENu 2003, art. 31, [4]), alors que l'Office fédérale pour la santé publique (OFSP) est en charge de la dernière catégorie de déchets (ORaP, [5]). La planification et la réalisation de cette élimination ont été confiées par ces acteurs à la Nagra, une société coopérative créée en 1972.

En Suisse, le stockage géologique profond des déchets radioactifs, tel que fixé par l'Ordonnance sur l'énergie nucléaire (OENu, [6]), prévoit l'installation de sites de stockage pour les deux catégories de

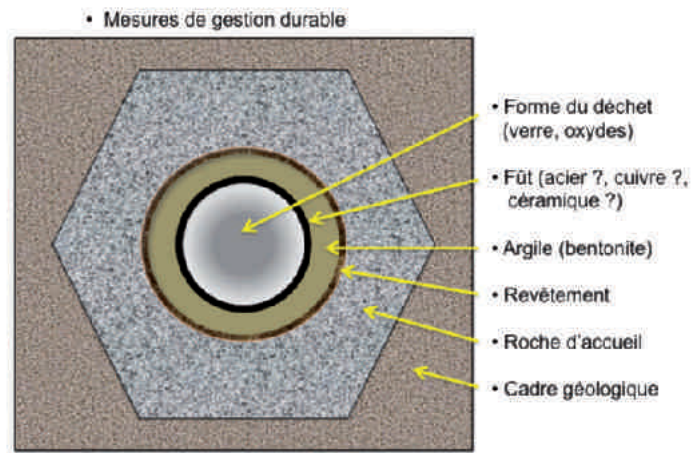


Fig. 1 Concept de barrières multiples (modifié d'après [7])

Multibarrierenkonzept (modifiziert nach [7])

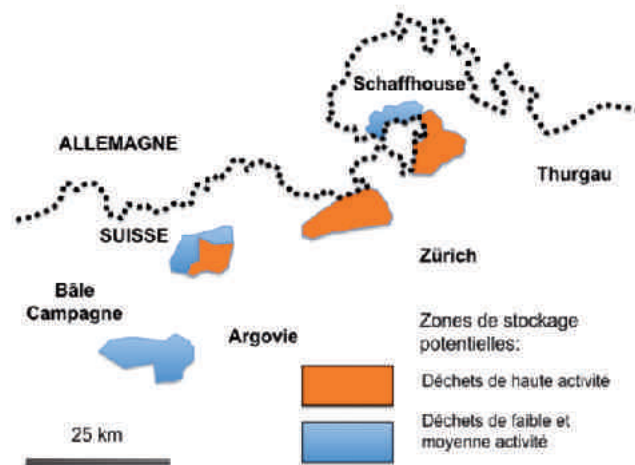


Fig. 2 Sites potentielles de stockage dans les argiles à Opalinus (modifié d'après Nagra 2011, [12])

Mögliche Tiefenlagerstandorte im Opalinuston (modifiziert nach Nagra 2011, [12])

déchets mentionnées ci-dessus selon un concept technique comprenant pour chaque site trois types d'installations avec des fonctions différentes (voir aussi le rapport EKRA [7]): Le dépôt principal, la zone expérimentale et le dépôt pilote (voir ci-dessous). Ce concept prévoit également la possibilité de réversibilité du stockage et de récupération des déchets jusqu'à la fermeture et le scellement définitif des dépôts.

Au printemps 2008 le Conseil fédéral a adopté le plan sectoriel «Dépôts en couches géologiques profondes» [8], un processus permettant la coordination de la recherche de sites de stockage sur le territoire national basée sur la Loi sur l'aménagement du territoire (LAT, [9]). Ce processus a permis dans une première étape la définition de cinq domaines géographiques et géologiques, localisés essentiellement dans le Nord-Est de la Suisse (fig. 2) et d'un 6^e domaine correspondant au Wellenberg dans le canton de

Nidwald, dans lesquels il s'agit maintenant de définir des sites potentiels pour l'établissement des dépôts pour les deux catégories de déchets (DFMA, DHA).

On peut supposer que le plan sectoriel conduira à l'établissement des seuls dépôts de déchets nucléaires réalisés au 21^e siècle en Suisse. Ces dépôts accueilleront un potentiel de toxicité très élevé, nécessitant une durée d'isolement de la biosphère de plusieurs milliers à plusieurs centaines de milliers d'années, en fonction de la nature des déchets considérés. En tenant compte du risque encouru par la population concernée en cas d'échec de l'opération, seules les meilleures solutions pourront être retenues pour la réalisation de ces dépôts.

L'analyse présentée ici pose la question de l'impact éventuel d'un dépôt géologique profond sur la sécurité nucléaire, et en particulier la qualité de l'eau potable, du début de sa construction jusqu'à la fin de l'isolement des déchets.

INSTALLATIONS NÉCESSAIRES À UN DÉPÔT GÉOLOGIQUE PROFOND

Un dépôt géologique tel que prévu au Nord-Est de la Suisse ressemble du point de vue de ses installations et de son fonctionnement à une mine. Ses différentes installations sont les suivantes (fig. 3):

INSTALLATIONS DE STOCKAGE

- Dépôt principal, cavernes de stockage: elles sont creusées dans la roche d'accueil (dans le Nord-Est de la Suisse: les Argiles à Opalinus) et reçoivent les déchets conditionnés et placés dans des fûts. Ces cavernes sont ensuite comblées par de la bentonite, un matériel argileux de provenance volcanique, qui peut absorber l'eau qui pénètre dans la caverne, qui gonfle à cette occasion et forme une barrière de très faible perméabilité contre la circulation d'eau (et éventuellement de gaz). Après leur comblement, les cavernes sont scellées. La Nagra [10] prévoit l'installation d'un dépôt de déchets faiblement et moyennement actif à 300 à 500 m et un dépôt de déchets hautement radioactifs à 400 à 900 m de profondeur.
- Dépôt principal, installations de service: elles permettent l'accueil et le transport des déchets et du matériel de comblement à l'intérieur de la mine.
- La zone expérimentale, destinée à valider les paramètres de la roche d'accueil et les différentes mesures techniques nécessaires à la sécurité du dépôt. Cette zone constitue un laboratoire souterrain, équipé de différents instruments de mesure et de surveillance.
- Le dépôt pilote, permet d'observer le comportement des déchets pendant une période plus ou moins longue (non déterminé par la loi), mais probablement d'au moins 150 à 200 ans. Ce dépôt reçoit une quantité représentative de déchets, stockés dans des cavernes équipées de senseurs; il permet ainsi de suivre l'évolution du site et l'état des déchets, soit pour valider les modèles de sécurité, soit pour déterminer les conditions d'un retrait éventuel.

INSTALLATIONS D'ACCÈS ET DE VENTILATION

Des mines souterraines disposent obligatoirement de deux ouvertures ou accès vers la surface:

- Un puits principal (ou éventuellement un tunnel d'accès), permettant l'évacuation des roches et des minerais dans le cas d'une exploitation, respectivement le transport des déchets et des matériaux de comblement dans le cas d'un site de stockage de déchets. Ce puits sert également à l'entrée de l'air de ventilation.
- Un puits ou une galerie de ventilation, assurant l'extraction de l'air de ventilation et, en cas de feu, de la fumée.

INSTALLATIONS DE SURFACE

Les installations de surface sont destinées aux différents services de la mine et au transbordement des déchets du transport routier ou ferroviaire vers la mine. Le projet actuellement étudié par la Nagra prévoit par ailleurs des installations de conditionnement de déchets sur ce site («hotlab»).

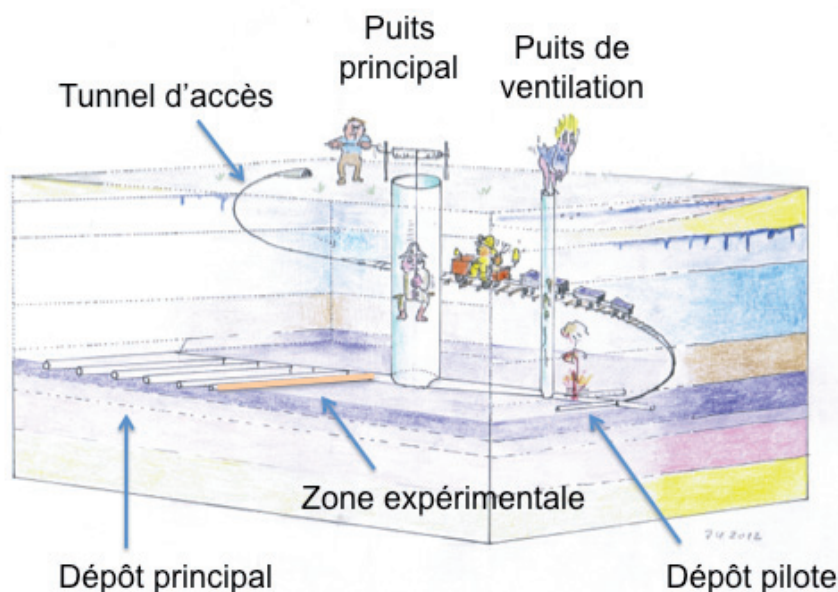
ANALYSE DE RISQUES: PÉRIODES À CONSIDÉRER

Les paramètres dont dépendra la sécurité du stockage, et avant tout la qualité radiologique des eaux souterraines à proximité des dépôts de déchets nucléaires, sont les suivants: la quantité de déchets, leur composition et leur conditionnement, la qualité des barrières naturelles et de leur environnement géologique et les options choisies pour la construction des dépôts profonds, des installations d'accès de et des installations de surface.

Dans une analyse de risque, trois phases temporelles et fonctionnelles des dépôts sont à considérer.

LA PHASE DE CONSTRUCTION

Pendant la phase de construction, d'une durée d'une dizaine d'années, on verra évoluer un grand chantier, semblable à un chantier de tunnel routier ou ferroviaire, avec les risques propres à ce genre d'opération et d'ouvrage. Aucune substance



- Installations de surface
- Installations d'accès
- Installations de stockage

Fig. 3 Installations d'un dépôt géologique profond, variante de base avec un simple accès par puits, variante Nagra 2011 [12] avec accès par tunnel (rampe) (Schéma: J. Uttinger)

Aufbau eines Tiefenlagers: Basisvariante mit einem einfachen Schachtzugang und Variante Nagra 2011 mit einem Tunnelzugang (Rampe)

radioactive ne sera manipulée sur site et l'expérience existante permet de croire à une maîtrise des risques.

Un problème particulier qui se posera sur ce chantier concerne la gestion des eaux provenant des différents aquifères rencontrés (aquifères de surface et aquifères profonds), leur captage et l'isolation des puits et éventuellement des tunnels d'accès (voir ci-dessous).

LA PHASE D'EXPLOITATION

La phase d'exploitation dure env. 150 à 200 ans (durée non déterminée dans la loi). Au début de cette phase, la zone expérimentale sera en fonction et le dispositif de surveillance du dépôt pilote sera actif. Les cavernes d'entreposage seront creusées au fur et à mesure, les déchets mis en place et les cavernes refermées. Les accès aux installations de service, à la zone expérimentale et au dépôt pilote seront ouverts et devront être consolidés et protégés contre l'intrusion d'eau. Cette exigence concerne donc les vides miniers creusés dans la roche d'accueil, les Argiles à Opalinus, dont la stabilité peut être considérée comme bonne dans un état sec, mais qui risquent d'être endommagés rapidement par l'eau, ou même de s'effondrer en cas d'inondation. D'autres risques concernent les incidents éventuels liés à la manipulation de déchets, les accidents de transport, les feux ou explosions (gaz miniers), le sabotage ou la chute d'un avion sur les installations de surface, ou encore des actions de guerre. Cette phase, peu étudiée à ce jour, comprend également des risques institutionnels, liés aux besoins d'entretien ou d'assainissement des galeries ouvertes et des installations d'accès, ainsi que des risques financiers liés aux coûts des opérations à long terme. A la fin de cette phase, soit les installations seront définitivement fermées et scellées pour le stockage final, soit les déchets seront récupérés et les installations comblées et fermées.

LA PHASE DE STOCKAGE FINAL

La phase de stockage final a une durée allant de quelques milliers jusqu'à plusieurs centaines de milliers d'années, soit la durée nécessaire à l'obtention d'un niveau suffisamment bas de la radioactivité des déchets. Pendant cette phase, l'eau contenue dans la roche d'accueil s'infiltrera dans le remplissage de bentonite des cavernes de stockage désor-

mais fermées et entrera en contact avec les fûts contenant les déchets nucléaires. En fonction des conditions chimiques et notamment de l'oxygène contenu dans le milieu souterrain, il est admis que la corrosion pourra attaquer les fûts et mobiliser éventuellement des substances radioactives. Des modèles de flux ou de dispersion de ces substances à travers la roche d'accueil, puis de l'entourage géologique, permettent d'estimer l'exposition potentielle au rayonnement ionisant d'une population consommant l'eau et les produits agricoles locaux de la région entourant le dépôt profond. La mobilité des radioisotopes dépendra de leur forme (dissoute ou particulaire), des conditions chimiques du milieu, de l'adsorption aux particules, de la complexation avec la matière organique, etc. Cette phase a fait l'objet de nombreuses études théoriques et expérimentales en laboratoire et sur le terrain. Dans son rapport de faisabilité d'un stockage des déchets de haute activité, la Nagra a établi des scénarios généralement plausibles concernant l'évolution des déchets et du dépôt [11].

Il ressort de cette analyse que la période critique par rapports aux risques en général, et aux risques environnementaux et à la qualité des eaux souterraines en particulier, concerne essentiellement la phase d'exploitation des dépôts.

MINIMISER LES RISQUES

La gestion des déchets en toute sécurité est conditionnée par une connaissance des risques, que ce soit pendant la phase d'exploitation des dépôts, ou pendant la phase de stockage final. Le traitement des déchets, le choix des sites, l'aménagement des dépôts et leur gestion sont sensés répondre aux exigences qui ressortent de cette analyse de risque.

PENDANT LA PHASE DE STOCKAGE FINAL

A ce jour, seule la phase de stockage final a fait l'objet d'une analyse de risque avancée. Cette analyse a conduit, à titre d'exemple, à la caractérisation des roches d'accueil et à la définition de l'environnement géologique nécessaire au stockage sûr. Parmi les principales questions qui n'ont pas trouvé de réponse satisfaisante on peut mentionner la teneur élevée en substances organiques de certains déchets de faible et moyenne activité, et avant tout des résines de filtration d'eau

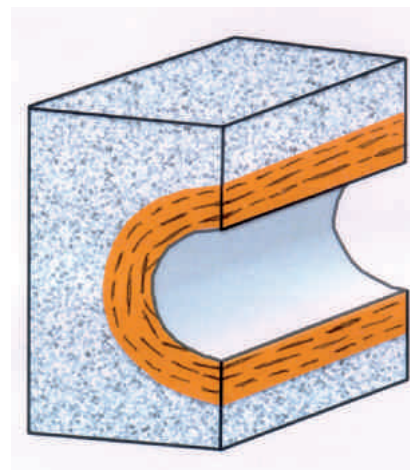


Fig. 4 EDZ (excavation damage zone ou zone perturbée) autour d'une caverne creusée dans la roche; présentation schématique d'après [14]

Schematische Darstellung der EDZ (excavation damage zone, Auflockerungszone) um eine Kaverne, die in den Felsen hineingetrieben wurde (nach [14])



Fig. 5 EDZ (excavation damage zone ou zone perturbée) dans les Argiles à Opalinus du laboratoire Mt Terri (Jura, Suisse) (Photo: M. Buser)

EDZ (excavation damage zone, Auflockerungszone) in Opalinuston im Felslabors Mont Terri (Jura, Schweiz)

radioactive, qui pourraient produire des quantités importantes de gaz en cas de décomposition microbienne dans le dépôt et ouvrir des cheminement de circulation d'eau, ou alors favoriser la complexation entre substances organiques et radioisotopes métalliques. Ces complexes seraient alors transportés plus facilement du dépôt vers la biosphère. Concernant les déchets de haute radioactivité, du gaz d'hydrogène peut être formé par un processus catalytique au contact de l'eau avec les fûts de conditionnement en acier. Des matériaux alternatifs seraient en conséquence à étudier pour ces fûts.

PENDANT LA PHASE D'EXPLOITATION

Aucune analyse de risque n'a en revanche été effectuée à ce jour concernant la phase d'exploitation, pendant laquelle certaines cavités du dépôt seront ouvertes. Nous tenterons ici une ébauche d'étude dans le but de déterminer les exigences éventuelles qui pourraient résulter de cette analyse par rapport à la conception des installations. Cette ébauche concerne plus particulièrement la question de l'accès au dépôt profond depuis les installations de surface. Un tel accès peut se faire par différentes installations, soit:

- Puits d'accès verticaux: Il s'agit de l'accès classique à une mine en sub-surface dans une situation topographique peu accidentée (fig. 3). Les installations comprennent classiquement deux puits verticaux au légèrement inclinés. Le puits principal est destiné au transport entre la surface et la mine; il est desservi par un ascenseur de grande capacité. Les diamètres maximaux de puits construits récemment se situent autour de 6 à 8 m. Un second puits, souvent de plus petit diamètre, est destiné à la ventilation et à l'extraction éventuelle de gaz ou de fumée.
- Puits d'accès inclinés: Dans certains cas, les puits peuvent être inclinés et, dans le cas d'un puits principal, desservi par un funiculaire.
- Tunnels d'accès horizontaux ou faiblement inclinés, desservis par un train de mine, ou éventuellement par des camions (fig. 3). Cette possibilité est souvent choisie dans des situations où la topographie montagneuse lui donne un avantage par rapport à un puits vertical. La solution de tunnels d'accès inclinés (rampes) a la préférence de la Nagra [12] pour le transport des matériaux d'excavation et des déchets. Ces tunnels seraient combinés avec un ou deux puits verticaux, notamment pour la ventilation.

Deux réflexions peuvent notamment donner une indication concernant les risques liés à de telles installations:

- Stabilité et durée de vie: Dans des conditions géologiques identiques, notamment dans des situations de couches géologiques proches de l'horizontale, les puits verticaux sont en général plus stables que les galeries horizontales ou faiblement inclinées et ont de ce fait une durée de vie supérieure. Dans la littérature il est généralement admis que tunnels ou galeries souterraines ont une espérance

de vie de 50 à 70 ans, et plus rarement de plus de 100 ans (ex. [13]). Des besoins d'entretien ou d'assainissement plus rapprochés dans le temps (30 à 40 ans) sont apparus récemment dans des tunnels autoroutiers, par exemple ceux du Belchen et du St Gothard. Pour une durée de vie de plus de 100 ans, notamment pour les accès et les locaux de service du dépôt géologique profond (zone expérimentale, accès au dépôt pilote), un renforcement des cavités par des tubings est de ce fait à prévoir de façon systématique.

- Risque d'inondation: Le risque d'inondation d'une voie d'accès dépendra d'abord de la position de l'entrée de la galerie par rapport aux eaux de surface et à une éventuelle nappe phréatique de faible profondeur. La cavité du tunnel d'accès, de même que l'EDZ (excavation damage zone ou zone perturbée) qui entoure la cavité (fig. 4 et 5) réagiront comme des drains, en collectant les eaux souterraines. La quantité d'eau collectée ainsi, qui devra être évacuée par pompage, dépendra notamment du système de revêtement du tunnel, de sa section et de sa longueur. Si le risque de rupture et d'inondation peut être considéré comme faible au début, il augmentera avec l'âge de l'ouvrage et son altération. Un accès qui traverse les aquifères souterrains sur la plus courte distance présentera ainsi le plus faible risque d'irruption d'eau.

Pour les premières années d'exploitation on peut prévoir une «maîtrise» des risques par des mesures techniques (ex. entretien des revêtements du tunnel, puissance des pompes installées). Dans une vision à plus long terme il serait cependant plus prudent d'éviter au maximum les risques par un choix réfléchi des installations, nécessitant le moins d'entretien possible. Ce choix se porterait alors avec une forte probabilité plutôt sur un accès aux dépôts géologiques profonds par des puits, en évitant tunnels et rampes.

CONCLUSIONS

Le concept des barrières multiples en milieu continental est la stratégie d'élimination privilégiée à l'échelle globale pour le stockage des déchets nucléaires. En Suisse, la sélection de sites est actuellement en cours dans le cadre du plan sectoriel «dépôts en couches géologiques profondes». A ce propos, les conclusions suivantes peuvent être tirées:

- L'analyse des risques du projet de stockage géologique se décline selon trois phases: phase de construction (env. une décennie), phase d'exploitation (env. 150 à 200 ans), phase de stockage (milliers à centaines de milliers d'années).
- Les risques liés à la première phase sont comparables à ceux d'un grand chantier de génie civil conventionnel; on peut les considérer comme gérables.
- La troisième phase, la plus longue dans le cadre du projet de stockage, et c'est également la phase la plus étudiée.
- La phase d'exploitation est la moins étudiée et c'est elle qui comporte actuellement à priori les risques les moins maîtrisés: risques d'inondation et d'endommagement (écroulement) des installations ouvertes en cas d'accident ou de vieillissement des installations.
- Une optimisation de la conception des installations d'accès s'impose; il s'agit avant tout de chercher les chemins les plus directs et les plus courts, en évitant au mieux la traversée des nappes phréatiques. La solution des puits répond mieux à cette exigence que celle de l'accès par un tunnel (une «rampe»).
- Plusieurs autres problèmes attendent une solution, parmi lesquels la minimisation de la matière organique dans les déchets de faible et moyenne radioactivité et la question du remplacement des fûts en aciers par d'autres matériaux (ex. céramique) pour les déchets de haute radioactivité.

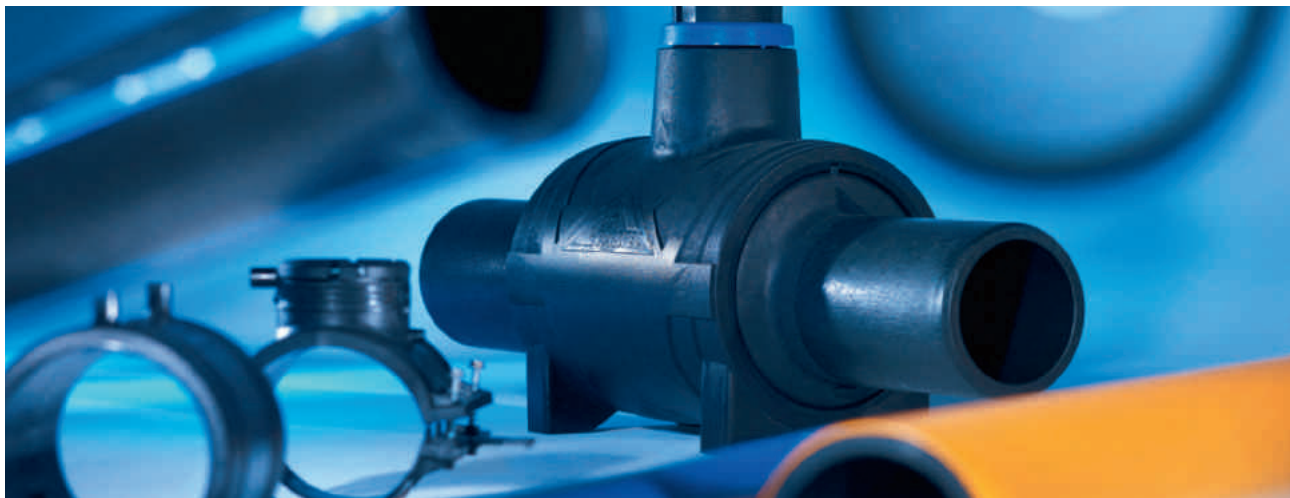
BIBLIOGRAPHIE

- [1] Calmet, D.P. (1989): *L'immersion de déchets radioactifs dans l'océan: le point sur la question.* Bulletin IAEA 4: 47-50
- [2] Milnes, A.G.; Buser, M.; Wildi, W. (1980): *Endlagerungskonzepte für radioaktive Abfälle im Überblick.* Z. dtsh. geol. Ges. 131: 359-385
- [3] DOE & USGS (1979): *Earth science technical plan for mined geological disposal of radioactive waste.* Department of Energy & U.S. Geological Survey, TID-29 018, Washington D.C.
- [4] LENu (2003): *Loi du 21 mars 2003 sur l'énergie nucléaire, RS 732.1*
- [5] ORaP (1994): *Ordonnance du 22 juin 1994 sur la radioprotection, RS 814.501*
- [6] OENu (2004): *Ordonnance du 10 décembre 2004 sur l'énergie nucléaire, RS 732.11*
- [7] EKRA (2000): *Modèles de gestion des déchets radioactifs. Groupe d'experts pour les concepts de stockage des déchets nucléaires, Département fédéral pour l'environnement, l'énergie, le transport, l'énergie et la communication (DETEC), Berne*

- [8] Ofen (2008): Plan sectoriel «Dépôts en couches géologiques profondes». Office fédéral de l'énergie
- [9] LAT (1979): Loi fédérale du 22 juin 1979 sur l'aménagement du territoire, RS 700
- [10] Nagra (2008): Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager; Darlegung der Anforderungen, des Vorgehens und der Ergebnisse. Technischer Bericht NTB 08-03, Société coopérative nationale pour le stockage des déchets radioactifs, Wettingen, 428 p.
- [11] Nagra (2002): Project Opalinus Clay, Safety Report. Technischer Bericht 02-05, Société coopérative nationale pour le stockage des déchets radioactifs, Wettingen
- [12] Nagra (2011): Vorschläge zur Platzierung der Standortareale für die Oberflächenanlage der geologischen Tiefenlager sowie zu deren Erschliessung. Technischer Bericht NTB 11-03, 3 vol., Société coopérative nationale pour le stockage des déchets radioactifs, Wettingen
- [13] Peng, Q. (2009): International conférence on Transportation engineering. Proceedings of the Second International Conference, July 25-27 2009, Southwest Jiaotong University, Chengdu, China, Volume 1. La Fontaine de Silè, 1 juil. 2009, 4470 p.
- [14] Quintessa Ltd (2011): Postclosure Safety Assessment: Analysis of the Normal Evolution Scenario. Prepared by NWMO DGR-TR-2011-26

> FORTSETZUNG DER ZUSAMMENFASSUNG

Zugangsanlagen Rechnung getragen werden. Für die Zugangsanlagen erscheinen Schächte als sicherer und über lange Frist standfester als Zugänge über Rampen (geneigte Tunnel).



Gas- und Wasserversorgung

Umfangreiches Sortiment und modernste Logistik. Rohre, Formteile, Armaturen und Hydranten, Rohrverbindungen und Problemlösungen – wann immer es um Materialien

für die Gas- und Wasserversorgung geht, bei Debrunner Acifer sind Sie an der richtigen Quelle.

Überall in Ihrer Nähe.

Debrunner Acifer

klöckner & co multi metal distribution

www.d-a.ch

