



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI
Inspection fédérale de la sécurité nucléaire IFSN
Ispettorato federale della sicurezza nucleare IFSN
Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate ENSI

Dépôts en couches géologiques profondes

STOCKER LES DÉCHETS RADIOACTIFS DE MANIÈRE SÛRE

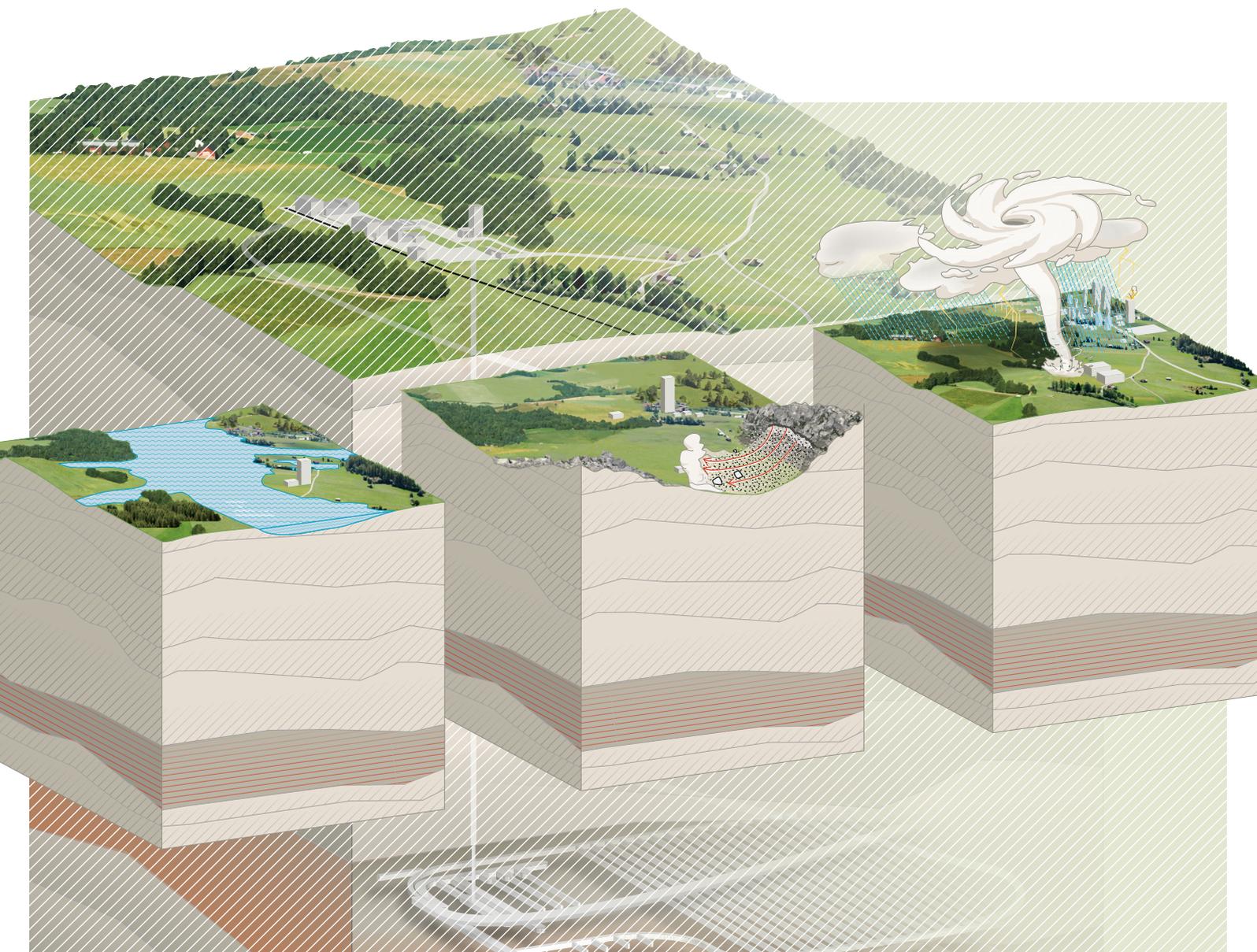


Table des matières

La participation a besoin d'information	3
Un long chemin jusqu'au dépôt en couches géologiques profondes.....	4
La Suisse cherche un dépôt : le plan sectoriel « Dépôts en couches géologiques profondes »	6
Deux dépôts pour les déchets radioactifs	8
Laboratoire souterrain du Mont Terri – Recherche à haut niveau.....	10
Le sous-sol est passé au crible.....	12
D'où proviennent les déchets radioactifs ?	14
Des barrières retiennent les substances radioactives	16
La sécurité par la distance : zone de protection autour du dépôt en couches géologiques profondes	18
Le risque radiologique à long terme d'un dépôt en couches géologiques profondes	20
Combien de temps dure un million d'années ?.....	22
Exigences élevées à la technique de construction.....	24
Ce que l'on voit d'un dépôt en couches géologiques profondes à la surface.....	26
Dangers durant le stockage	28
Dangers naturels pour les infrastructures de surface.....	30
L'érosion et la perspective à long terme	32
Lorsque la terre tremble.....	34
L'eau souterraine	36
Formation de gaz et activité microbienne.....	38
Un dépôt en couches géologiques profondes libère de la chaleur	40
La sécurité prime	42

IMPRESSUM

Brochure d'information — Dépôts en couches géologiques profondes, 3e édition, ENSI 33/879
© 2021 Inspection fédérale de la sécurité nucléaire (IFSN)

EDITEUR

IFSN

Industriestrasse 19

CH-5201 Brugg

Téléphone: +41 56 460 84 00

E-Mail: info@ensi.ch

Internet: www.ensi.ch

Suivez-nous sur: twitter.com/IFSN_CH

GRAPHIQUES ET ILLUSTRATIONS

nougat GmbH, St. Johans-Vorstadt 17, CH-4056 Basel

Pages 22/23 : utilisation d'illustrations du musée du mammut de Niederweningen

La participation a besoin d'information

Chères lectrices, chers lecteurs,

En Suisse, des déchets radioactifs sont produits depuis plus de cinquante ans lors de la production d'électricité dans les centrales nucléaires et par des applications dans la médecine, l'industrie et la recherche. Ils résultent aussi bien de l'exploitation d'installations que de leur désaffectation.

Avec la loi sur l'énergie nucléaire, la Suisse a défini la manière de gérer ces déchets radioactifs : le stockage en couches géologiques profondes. Au niveau international, les experts sont d'accord sur le fait que seule cette méthode de gestion protège à long terme l'être humain et l'environnement face aux dangers des déchets radioactifs. La loi sur l'énergie nucléaire prescrit également que la gestion des déchets et la recherche de sites doivent être réalisées en Suisse.

Les producteurs de déchets sont responsables de leur gestion. Ils ont fondé en 1972 la Société coopérative nationale pour le stockage des déchets radioactifs (Nagra). Celle-ci doit élaborer des solutions pour une gestion sûre des déchets. En tant qu'autorité de surveillance, l'Inspection fédérale de la sécurité nucléaire (IFSN, établi pour ce faire les exigences de sécurité et vérifie les propositions de la Nagra.

La recherche de sites pour le stockage des déchets radioactifs est une tâche interdisciplinaire et exigeante. C'est pourquoi le Conseil fédéral a adopté en 2008 le plan sectoriel « Dépôts en couches géologiques profondes ». Lors de cette procédure de sélection, la sécurité a la plus haute

priorité. Ce plan sectoriel garantit une participation à temps des autorités concernées, des organisations spécialisées et des régions. Il crée ainsi les conditions pour un procédé systématique, transparent et participatif.

La participation se base sur l'information. Dans cette optique, nous vous livrons avec cette brochure un aperçu des aspects du point de vue de la sécurité technique du stockage en profondeur. Cette brochure contient des réponses aux questions posées au « Forum technique sur la sécurité ». Ce forum, dirigé par l'IFSN, constitue une plateforme centrale d'information et d'échanges dans la procédure du plan sectoriel. Des spécialistes de différents comités et organisations participent à ce forum. Il permet de discuter et de répondre à des questions techniques et scientifiques sur la sécurité et la géologie. Celles-ci proviennent de la population, de communes, de régions d'implantation, d'organisations, de cantons et de collectivités d'États limitrophes concernés. Il veille à ce que le public reçoive de manière appropriée des informations étayées. Des questions et réponses concrètes issues du Forum technique sur la sécurité en constituent la base.

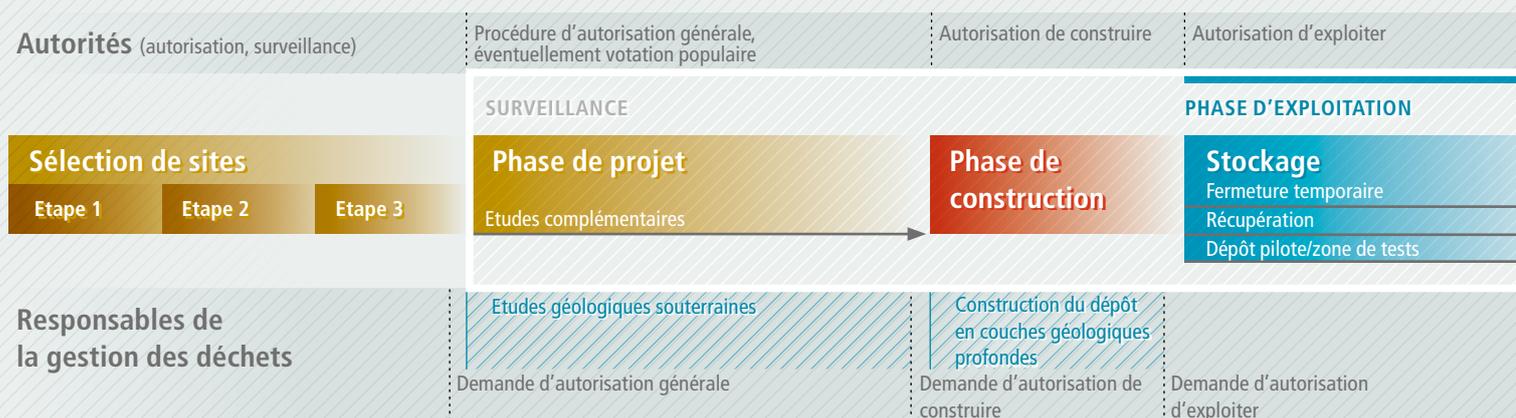
Je vous souhaite une bonne lecture !

**VOUS AVEZ ENCORE DES QUESTIONS ? –
ALORS TOURNEZ LES PAGES !**



Dr Felix Altorfer

Membre de la direction de l'IFSN
Chef du domaine de surveillance Gestion des déchets



Un long chemin jusqu'au dépôt en

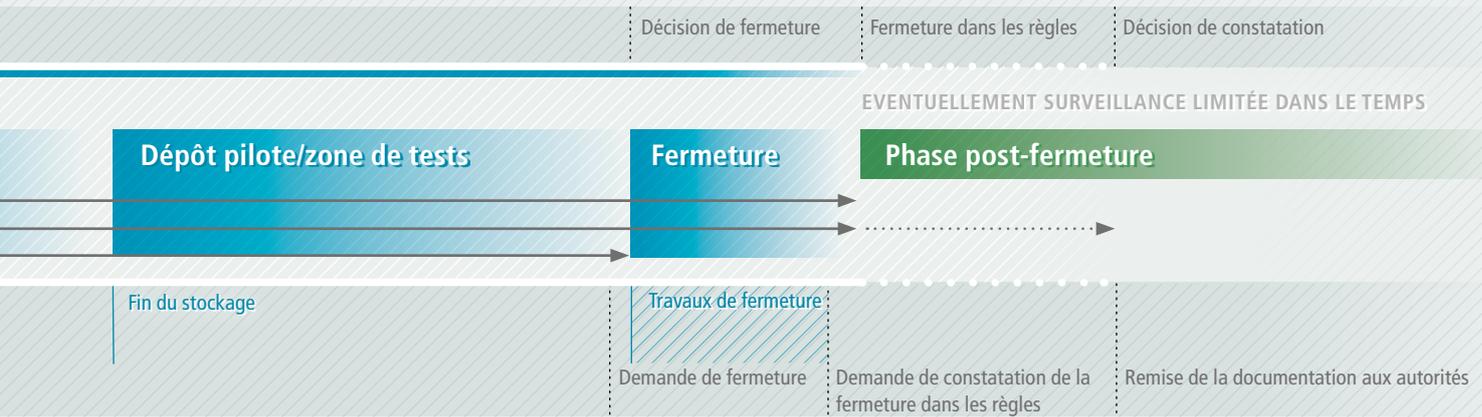
La Suisse a des déchets radioactifs. Ceux-ci proviennent de la production de courant électrique et de l'utilisation de matériaux radioactifs dans la médecine, l'industrie et la recherche. La radioactivité dans les déchets décroît sur une longue période. En tant que génération profitant de cette énergie, nous avons le devoir de chercher et d'appliquer des solutions durables pour la gestion des déchets. La loi suisse sur l'énergie nucléaire prescrit que tous les déchets radioactifs doivent être mis dans des dépôts en couches géologiques profondes.

En vertu de la loi, la gestion sûre des déchets relève de la compétence des producteurs de déchets. Ceux-ci supportent également les coûts de leur gestion. La Confédération est responsable des déchets radioactifs issus de la médecine, de l'industrie et de la recherche. Les déchets radioactifs issus de la production d'électricité sont quant à eux placés sous la responsabilité des sociétés exploitantes de centrales nucléaires. En vue du stockage des déchets radioactifs, les sociétés exploitantes des centrales suisses ont fondé avec la Confédération la Société coopérative nationale pour le stockage des déchets radioactifs (Nagra). Cette dernière élabore les bases technico-scientifiques pour la gestion des déchets radioactifs. Elle propose des domaines d'implantation pour des dépôts en couches géologiques profondes. De plus, elle mène des études pour la caractérisation des domaines d'implantation. Enfin, elle prépare la construction et l'exploitation des installations. En tant qu'autorité de surveillance indépendante, l'IFSN vérifie si la Nagra respecte les prescriptions légales et tient compte de l'état interna-

tional de la science et de la technique. L'IFSN est soutenue dans son travail par des experts indépendants issus de la recherche et du secteur privé.

En principe, les déchets radioactifs doivent être stockés en Suisse. La loi n'exclut certes pas des solutions internationales. En pratique, pourtant des dépôts internationaux auraient des difficultés à être réalisés, notamment en raison des conditions cadres de chacun des États. Une étape importante vers la création d'un dépôt en couches géologiques profondes en Suisse est la recherche de domaines d'implantation appropriés. Cette sélection de sites est réglée dans le plan sectoriel « Dépôts en couches géologiques profondes ». Un site pour un dépôt de déchets hautement radioactifs (DHR) ainsi qu'un site pour un dépôt de déchets faiblement et moyennement radioactifs (DFMR) sont sélectionnés par ce biais. La recherche de sites a commencé en 2008. Il est prévu qu'elle se termine en 2029 par une décision du Conseil fédéral.

Dès qu'un site approprié sera trouvé, il restera encore un long chemin à parcourir jusqu'à la construction du dépôt en couches géologiques profondes, au stockage des déchets radioactifs et à la fermeture complète de tous les accès. Ce chemin est marqué par différents jalons. Il s'agit de différentes phases d'autorisations concernant la construction, l'exploitation, l'observation et la fermeture. Après la fermeture conforme aux règles ou une période fixée de surveillance, le Conseil fédéral constatera que le dépôt n'est plus soumis à la législation sur l'énergie nucléaire. La Confé-



couches géologiques profondes

dération pourra ordonner des mesures au-delà de ce délai à l'instar d'une surveillance de l'environnement. D'après le calendrier actuel, le stockage de déchets faiblement et moyennement radioactifs ne débutera pas avant 2050. Pour les déchets hautement radioactifs, il faudra attendre au minimum jusqu'en 2060. Beaucoup de déchets faiblement et moyennement radioactifs seront produits lors de la désaffectation des centrales nucléaires. Avant que

des déchets hautement radioactifs puissent être stockés, ils doivent être entreposés près d'une quarantaine d'années en vue de leur refroidissement.



ENSI 33/592: Stellungnahme zum Entsorgungsprogramm 2016 der Entsorgungspflichtigen, ENSI, 2018.

ENSI 35/114: Stellungnahme zu NTB 08-02 «Bericht zum Umgang mit den Empfehlungen in den Gutachten und Stellungnahmen zum Entsorgungsnachweis», ENSI, 2012.

Questions en suspens et la réalisation d'un dépôt en couches géologiques profondes

Beaucoup de décisions sur le long chemin vers le stockage en couches géologiques profondes ne sont pas encore prises. Par exemple, l'accès au dépôt doit-il s'effectuer dans le sous-sol à l'aide d'une rampe ou d'un puits ? Ces questions, et d'autres encore, seront analysées à chaque phase d'autorisation, comme dans la démonstration de faisabilité du stockage des déchets, dans les étapes du plan sectoriel et les demandes d'autorisation générale et de construire. La planification et la construction du dépôt peuvent donc être adaptées à de nouvelles connaissances issues de la technique et de la science.

L'évolution de la clarification des questions en suspens est documentée dans le programme de gestion des déchets des responsables de la gestion des déchets. Ce programme qui doit être actualisé tous les cinq ans est contrôlé par l'IFSN, et approuvé par le Conseil fédéral après examen. L'IFSN recommande au Conseil fédéral dans ses prises de position les conditions des programmes de gestion des déchets à déposer à l'avenir. Ces documents contiennent les indications suivantes :

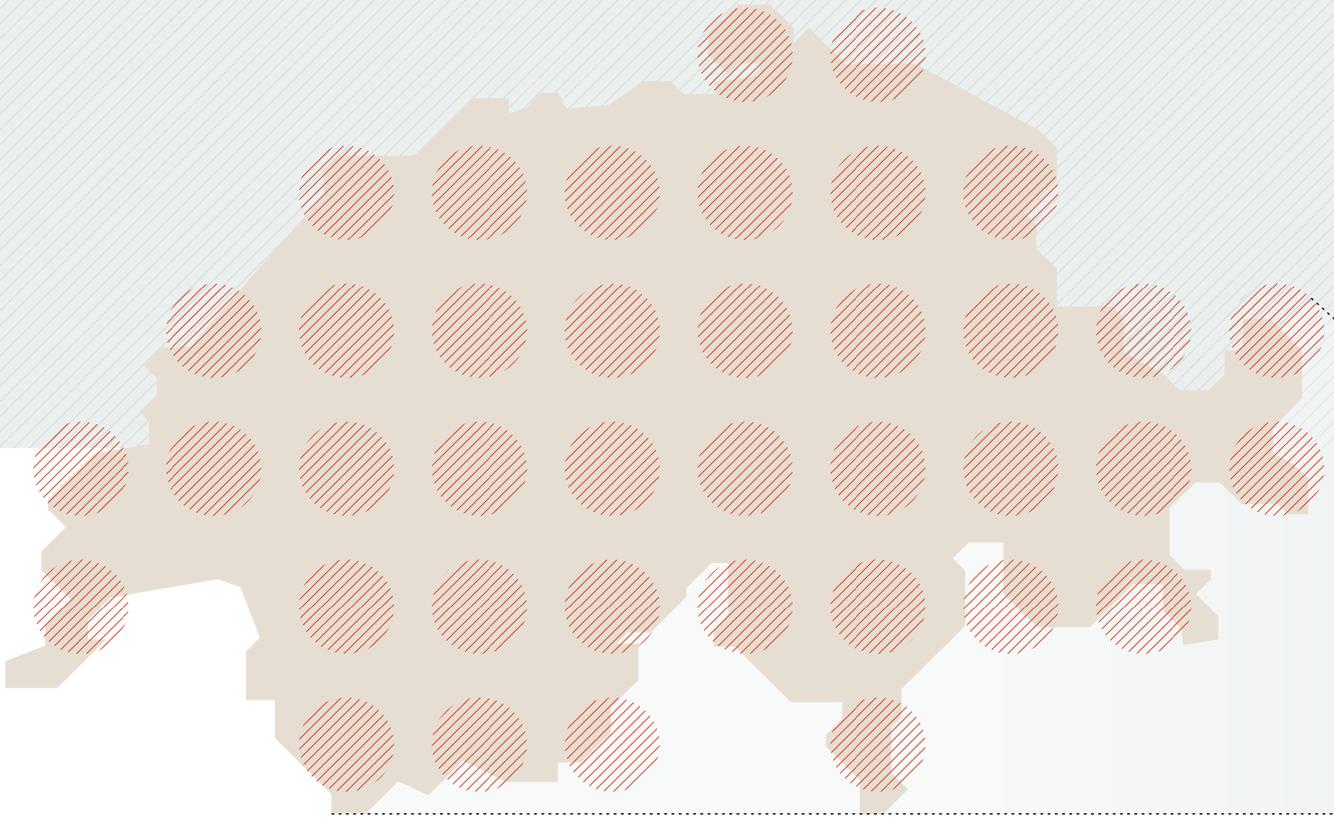
- l'origine, le type et la quantité des déchets radioactifs ;
- les dépôts en couches géologiques profondes requis et leurs concepts de stockage ;
- l'attribution des déchets aux dépôts en couches géologiques profondes ;
- le plan de réalisation des dépôts en couches géologiques profondes ;
- la durée et la capacité nécessaires à l'entreposage ;
- la planification des coûts de toutes les opérations de gestion des déchets jusqu'à la fermeture des dépôts en profondeur.

Le programme de recherche Nagra fait également partie du programme de gestion des déchets. Ce programme permet de montrer les activités de recherche et de développement grâce auxquelles les questions en suspens sont examinées et à quel moment celles-ci doivent être clarifiées. L'IFSN se prononce aussi sur ce rapport.

Forum technique sur la sécurité, questions 50, 64 et 811



ENSI 33/593: Empfehlungen und Hinweise aus der Beurteilung des Entsorgungsprogramms und des RD&D-Plans 2016.

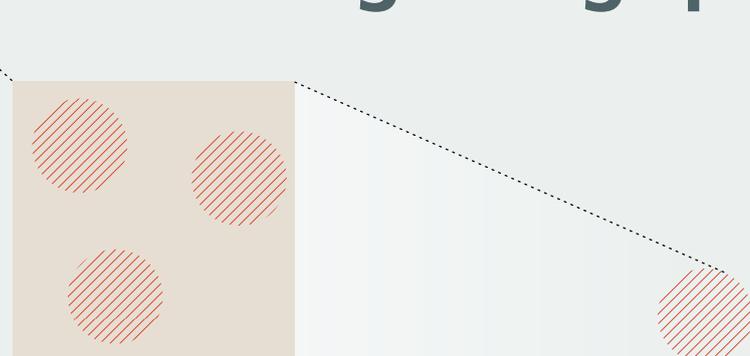


Le plan sectoriel « Dépôts en couches géologiques profondes » fixe la procédure de sélection de sites en Suisse pour les dépôts en couches géologiques profondes de déchets radioactifs. Les plans sectoriels sont un instrument d'aménagement du territoire et organisent la collaboration entre la Confédération et les cantons. La conception du plan sectoriel « Dépôts en couches géologiques profondes » a été élaborée par l'Office fédéral de l'énergie en collaboration avec d'autres autorités et organisations. Elle a été adoptée en 2008 par le Conseil fédéral. Le plan sectoriel doit permettre une sélection de sites transparente et juste.

Le but du stockage en couches géologiques profondes est la protection à long terme de l'être humain et de l'environnement. La sélection de sites se déroule en conséquence d'abord selon des critères de sécurité. D'autres critères comme les aspects sociaux et économiques jouent un rôle secondaire. Au terme de la procédure, des sites seront fixés. Un de ceux-ci accueillera les déchets hautement radioactifs et un autre les déchets faiblement et moyennement radioactifs. Il est aussi possible qu'un seul site serve de dépôt combiné à toutes les catégories de déchets.

La procédure du plan sectoriel est échelonnée. Elle se compose de trois étapes. Lors de **L'ÉTAPE 1**, la Nagra a proposé des domaines d'implantation géologiques appropriés. Six domaines ont été suggérés pour un dépôt de déchets faiblement et moyennement radioactifs et trois domaines pour un dépôt de déchets hautement radioactifs. Tous ces sites remplissent les critères techniques et de faisabilité technique imposés par la Confédération. La Nagra s'est basée sur les données géologiques alors disponibles. Elle devait en outre tenir compte des nombreuses exigences des autorités. L'IFSN a vérifié la proposition de la Nagra et a approuvé les domaines d'implantation. D'autres organes en Suisse et à l'étranger ont aussi recommandé d'analyser de manière approfondie tous les domaines d'implantation proposés durant l'étape 2. En préparation à cette étape, la participation régionale a été mise en place. Les régions d'implantation peuvent y représenter leurs intérêts dans le cadre des « conférences régionales ». L'étape 1 s'est conclue fin 2011 lorsque le Conseil fédéral a retenu tous les domaines d'implantation géologiques.

La Suisse cherche un dépôt : le plan sectoriel « Dépôts en couches géologiques profondes »



Lors de l'**ÉTAPE 2**, des domaines d'implantation ont été comparés du point de vue de la sécurité technique. La Nagra a proposé ensuite, en se basant sur cette comparaison, d'analyser de manière approfondie les domaines d'implantation Jura-est et Zurich nord-est à l'étape 3. L'IFSN a examiné la proposition et a conclu qu'il faudra aussi continuer à chercher des dépôts au Nord des Lägern. Le Conseil fédéral a décidé fin 2018 de poursuivre la procédure dans l'étape 3 avec ces trois domaines. Dans tous les domaines d'implantation, il est possible de stocker des DHR et DFMR. En plus de la limitation des sites éventuels, la Nagra a élaboré et désigné dans l'étape 2, en étroite collaboration avec les régions d'implantation, des emplacements pour des infrastructures de surface. En plus de l'évaluation de sécurité technique qui jouit toujours de la priorité la plus élevée des aspects socio-économique et liés à l'aménagement du territoire sont également analysés.

À la fin de l'**ÉTAPE 3**, une ou deux autorisations générales pour les dépôts en couches géologiques profondes sont accordées. L'IFSN a précisé les exigences pour cette dernière étape. La Nagra examine les trois domaines d'implantations par des forages en profondeur et des mesures sismiques 3D. Les projets de stockage sont concrétisés en tenant compte des régions d'implantation et les effets du dépôt sur la société et l'économie sont étudiés de manière approfondie. La Nagra annoncera probablement en 2022 les sites choisis. Il est prévu qu'elle remette en 2024 les documents finaux pour les demandes d'autorisation générale pour les sites choisis. Ces demandes seront examinées par l'IFSN et d'autres services spécialisés. Le Conseil fédéral prendra une décision probablement en 2029 à propos des autorisations générales qui doivent être approuvées par le Parlement. Ces décisions relatives aux sites sont soumises au référendum facultatif national. Le peuple suisse a ainsi le dernier mot sur la recherche de sites.



ENSI 33/649: Präzisierungen der sicherheitstechnischen Vorgaben für Etappe 3 des Sachplans geologische Tiefenlager, 2018.

OFEN (2011): Plan sectoriel « Dépôts en couches géologiques profondes » – Conception générale, OFEN (révision du 30 novembre 2011).

HSK 33/001: Sachplan geologische Tiefenlager – Herleitung, Beschreibung und Anwendung der sicherheitstechnischen Kriterien für die Standortevaluation, HSK, 2007.

Deux dépôts pour les déchets radioactifs

Les déchets radioactifs produits aujourd'hui représentent un danger pour l'être humain et l'environnement pour des milliers d'années. Ils doivent donc être stockés de sorte que la protection de l'être humain et de l'environnement soit garantie sur le long terme. Les dépôts en couches géologiques profondes sont les seules installations à offrir une telle protection à long terme. D'autres modèles de gestion comme des dépôts à la surface, l'immersion en mer ou l'envoi de fusées dans l'espace ont été examinés par le Groupe d'experts pour les modèles de gestion des déchets radioactifs (EKRA). Ces options ont été rejetées parce qu'elles n'étaient pas sûres. Le modèle de gestion des déchets actuel prévoit la construction d'un dépôt géologique en profondeur pour déchets faiblement et moyennement radioactifs, ainsi que la construction d'un dépôt en couches géologiques profondes pour déchets hautement radioactifs. Un dépôt en couches géologiques profondes combiné avec une installation de surface commune est aussi possible.

Un dépôt en couches géologiques profondes se compose d'un laboratoire souterrain, d'un **dépôt pilote**, d'un **dépôt principal** et des **zones expérimentales**. Avant le début de la construction, un laboratoire souterrain sera aménagé dans les zones expérimentales. Des expériences peuvent y être menées directement sur la roche d'accueil. De même, les propriétés du domaine d'implantation peuvent y être vérifiées. Une fois que les

données acquises ont confirmé le respect des hautes exigences de sécurité, la construction des autres parties du dépôt peut démarrer (d'abord le dépôt pilote, puis le dépôt principal). Dans le dépôt pilote, des déchets représentatifs pour le dépôt en couches géologiques profondes sont stockés et surveillés sur une longue période. Aussi bien dans le laboratoire souterrain que dans le dépôt pilote, des hypothèses importantes et des paramètres à la base du concept de barrières et de dépôt peuvent être vérifiés. Après le comblement du dépôt pilote et le début de sa surveillance, le stockage des déchets radioactifs commence dans le dépôt principal.

Le stockage des déchets faiblement et moyennement radioactifs débutera au plus tôt en 2050. Les déchets hautement radioactifs doivent d'abord être entreposés 40 ans dans un dépôt intermédiaire afin qu'ils refroidissent suffisamment. Leur stockage démarrera vers 2060. Environ 20 ans plus tard, le stockage sera terminé. Il s'ensuivra une phase d'observation dont la durée sera fixée par les futures autorités. Aussi pendant cette phase d'observation, une récupération des déchets doit être encore possible. Des mesures techniques, comme le fait de garder des galeries d'accès ouvertes, facilitent la récupération. Celle-ci reste toutefois possible après la fermeture du dépôt en profondeur. Elle engendre alors un effort plus important. Si la protection durable de l'être humain et de l'environnement est garantie, le Conseil fédéral ordonne ensuite la fermeture. Les parties encore ouvertes du dépôt en profondeur sont alors comblées et scellées. Le dépôt fermé ne doit plus être entretenu ou surveillé par les générations suivantes. Une surveillance peut toutefois être poursuivie dans le cadre de la veille environnementale nationale.



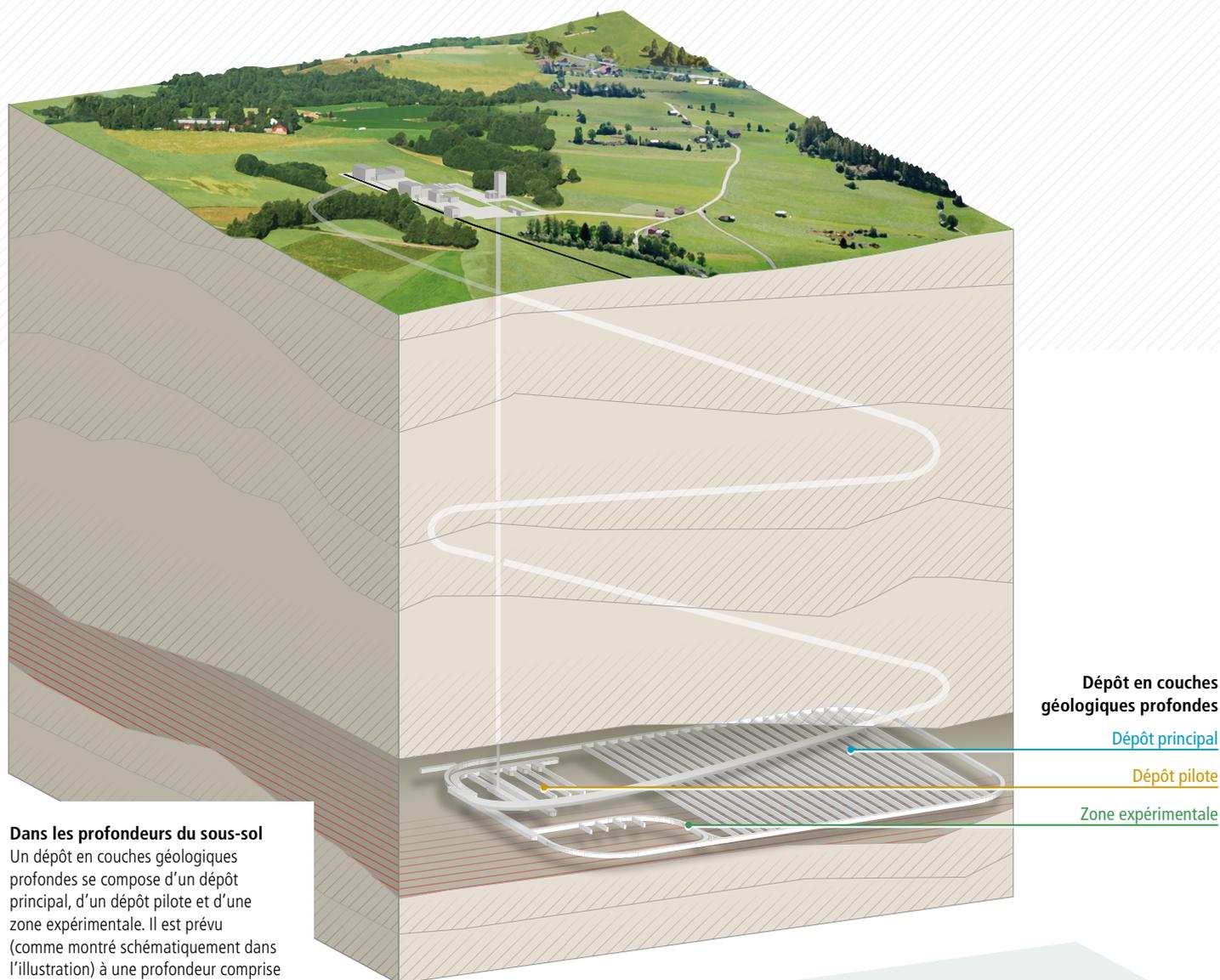
OFEN (2011): Plan sectoriel « Dépôts en couches géologiques profondes »
Conception générale, OFEN (révision du 30 novembre 2011).

NTB 02-02: Projekt Opalinuston, Konzept für die Anlage und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers, Nagra, 2002.

Quand un dépôt combiné est-il possible ?

Un dépôt combiné comprend deux secteurs de stockage séparés dans l'espace pour les déchets hautement radioactifs, d'une part, et de l'autre pour les déchets faiblement et moyennement radioactifs. Ils utilisent des installations communes (zone de confinement géologique dans la roche d'accueil) à la surface. Les mêmes exigences de sécurité sont tout aussi valables pour un dépôt combiné que pour des dépôts en profondeur particuliers, conformément aux prescriptions spécifiées de l'IFSN. Cela suppose que le sous-sol offre suffisamment de place.

En raison des exigences plus élevées pour les barrières géologiques, et de la période plus longue prise en compte pour un dépôt de déchets hautement radioactif (DHR), le choix d'un site du dépôt de DHR doit être fait d'abord dans l'étape 3. Ensuite, le site de dépôt des déchets faiblement et moyennement radioactifs (DFMR) sera choisi. La Nagra ne peut proposer un dépôt combiné que si l'emplacement des sites pour les DHR et les DFMR dans le même lieu d'implantation présente des avantages du point de vue de la sécurité technique. Pour cela, les interactions possibles entre ces deux sites ne doivent pas altérer la sécurité. *Forum technique sur la sécurité, questions 41, 113, 116, 140*



Dans les profondeurs du sous-sol

Un dépôt en couches géologiques profondes se compose d'un dépôt principal, d'un dépôt pilote et d'une zone expérimentale. Il est prévu (comme montré schématiquement dans l'illustration) à une profondeur comprise entre 500 et 900 mètres.

Quels sont les travaux de recherche nécessaires pour poursuivre le développement du concept de dépôt existant ?

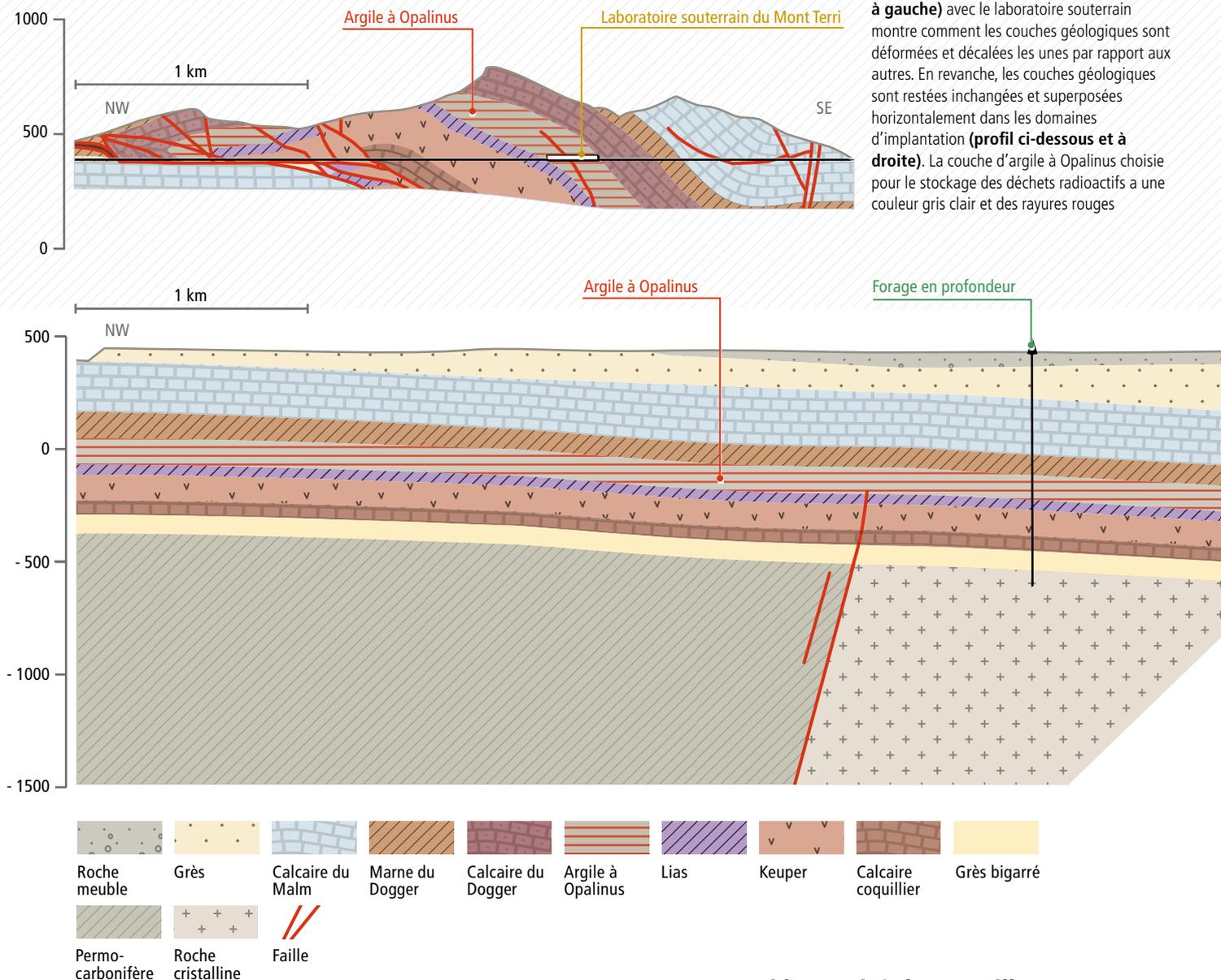
L'IFSN a discuté des différentes questions dans le cadre du projet de recherche « Conception du dépôt » du Groupe de travail de la Confédération pour la gestion des déchets radioactifs (AGNEB). En outre, la conception du dépôt dans la roche d'accueil argileuse dans d'autres pays (Belgique, France et Canada) a été décrite dans le rapport. Les principales questions étaient :

- Quelles sont les possibilités de disposition des galeries de dépôt qui existent et quels sont leurs avantages et inconvénients ?
- Comment faut-il adapter de façon optimale la conception du dépôt à la situation géotectonique sur le site (géométrie et fréquence de la surface de séparation, répartition des contraintes) ?
- Par quelles techniques peut-on éviter efficacement et à long terme les pénétrations d'eau dans les édifices d'accès (puits/ rampe) lors de la traversée des aquifères ou des zones de faille ou atténuer leur impact ?
- Quels sont les avantages et les inconvénients des différentes possibilités de combinaisons de puits et de rampes dans les édifices d'accès ?
- Quels sont les avantages et les inconvénients d'un dépôt combiné en matière de technique de sécurité ?
- Quelle est l'influence de la taille du conteneur sur le concept de stockage ?



ENSI 33/503: Schlussbericht zum Agneb-Forschungsprojekt Lagerauslegung.

Forum technique sur la sécurité, questions 40, 54, 78, 110, 129 et 151



Roche identique, conditions différentes

Le laboratoire souterrain effectue des recherches sur l'argile à Opalinus. Cette roche est prévue en Suisse comme roche d'accueil pour le stockage des déchets radioactifs. Toutefois, tous les résultats des recherches du laboratoire souterrain du Mont Terri ne peuvent pas être transférés directement vers les domaines d'implantation du nord de la Suisse. Les roches du nord de la Suisse se superposent de façon régulière (profil en haut), tandis que les roches du Mont Terri sont plissées et inclinées (profil tout en haut à gauche), ce qui implique des déformations et des failles de la ligne rocheuse, ou la faible profondeur par rapport au sous-sol. Ces caractéristiques incluent la résistance à la pénétration de l'eau, les petits diamètres des pores de la roche ou le pourcentage élevé de minéraux argileux qui composent l'argile à Opalinus. Les méthodes développées, et la recherche sur les barrières techniques prévues dans le dépôt en profondeur, comme les conteneurs pour dépôt en profondeur ou les matériaux de comblement, peuvent être utilisées plus tard directement dans le dépôt en couches géologiques profondes.

Pourquoi l'autorité de surveillance effectue des recherches dans le laboratoire souterrain du Mont Terri

L'IFSN définit l'état de la science et de la technique. Celui-ci se base sur la recherche internationale, telle qu'elle est effectuée dans le laboratoire souterrain du Mont Terri. L'IFSN fait partie d'un réseau national et international. Elle entretient la collaboration avec les autorités compétentes et les spécialistes.

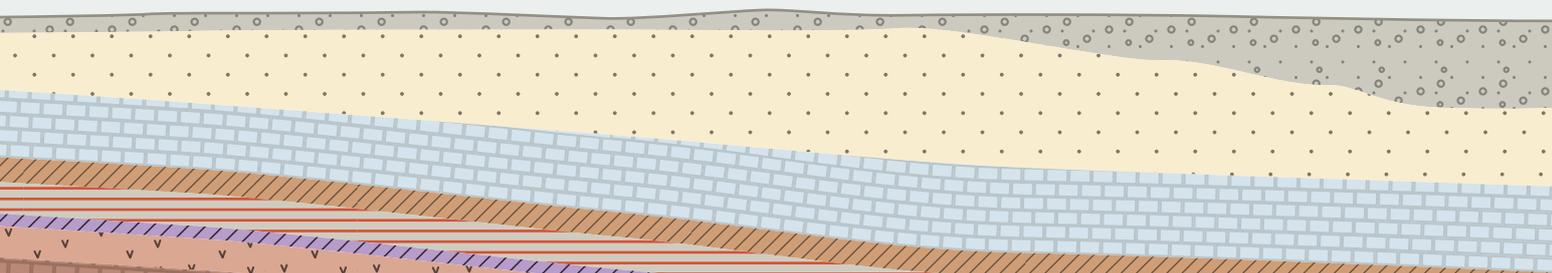
L'IFSN élargit les compétences professionnelles de ses collaborateurs et de ses spécialistes.

L'IFSN valide ses propres modèles de calcul en s'appuyant sur les résultats obtenus de manière indépendante sur le terrain. Cela lui permet de vérifier les documents de la Nagra.

L'IFSN peut donner de nouvelles impulsions à la recherche qui, selon elle, n'ont pas encore été suffisamment prises en compte.

Laboratoire souterrain du Mont Terri – Recherche à haut niveau

SE



Toutes les questions relatives au stockage en couches géologiques profondes ne sont pas dès à présent définitivement élucidées. Cela n'est pas non plus nécessaire, parce que la construction, l'exploitation et la fermeture auront lieu dans un futur lointain. Dès à présent, des connaissances concernant les caractéristiques importantes de l'argile à Opalinus relatives à la sécurité sont collectées dans le cadre de projets de recherche internationaux au laboratoire souterrain du Mont Terri, situé à proximité de St-Ursanne (JU), loin des sites proposés pour les dépôts en couches géologiques profondes. Ainsi, le laboratoire souterrain contribue à la gestion sûre des déchets radioactifs.

La recherche dans le laboratoire souterrain couvre trois thèmes généraux:

- Recherche et développement (p. ex. méthodes de mesure pouvant être utilisées pour l'exploration et l'observation des dépôts en couches géologiques profondes)
- Caractérisation de l'argile à Opalinus (caractéristiques de la roche, voir encart à gauche « Roche identique, conditions différentes »)
- Optimisation des systèmes de barrières techniques (p. ex. expériences de démonstration pour montrer l'interaction entre les déchets et l'argile à Opalinus)

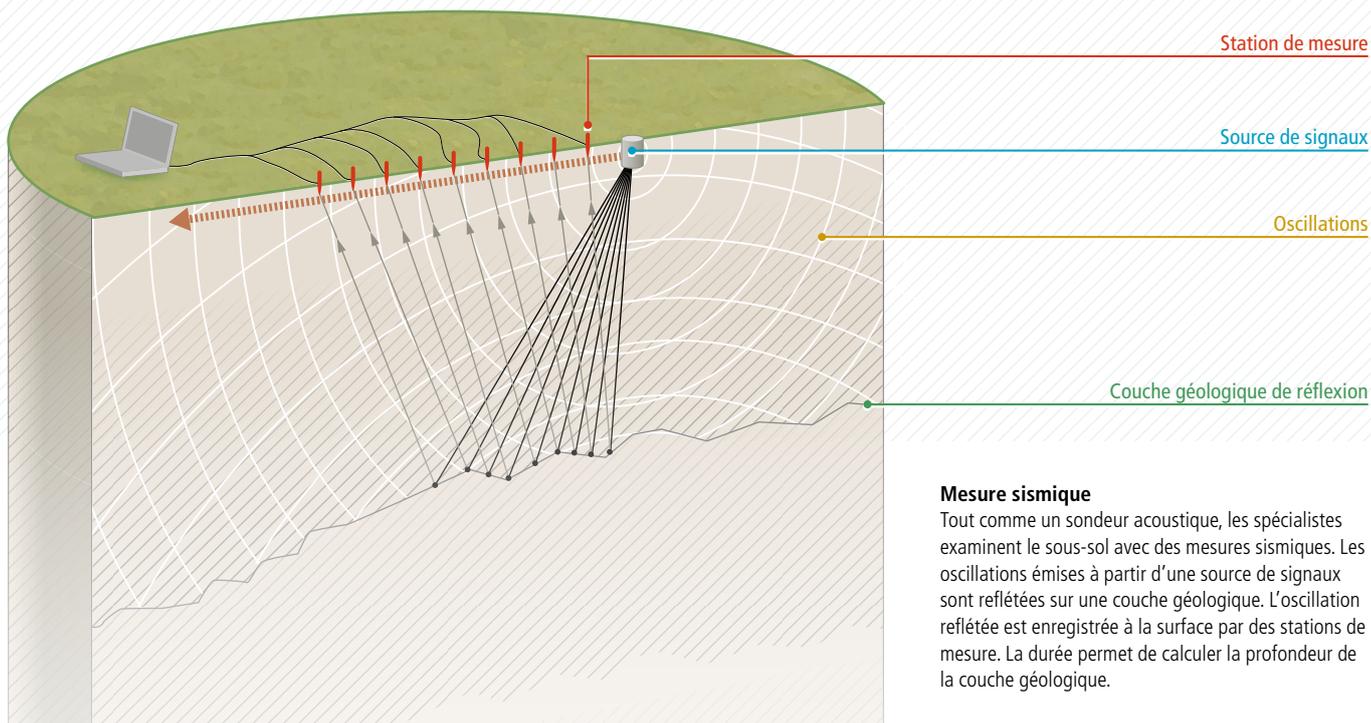
Depuis sa création en 1994, le projet Mont Terri n'a cessé de croître. Aujourd'hui, 22 organisations partenaires en provenance de 9 pays y mènent des recherches. La structure d'organisation démocratique du projet acceptée par les organisations partenaires constitue une particularité.

Les programmes de recherche annuels sont aussi adoptés au sein de cette structure. De 1996 à mi-2021, 103 millions de francs au total ont été investis dans plus de 150 expériences. Le laboratoire souterrain est exploité par l'Office fédéral de topographie (swisstopo). L'installation souterraine a été prolongée et agrandie plusieurs fois. Lors de son dernier agrandissement, 515 mètres de galeries supplémentaires ont été ajoutés en 2019. Par conséquent, les galeries disponibles aujourd'hui pour les expériences ont une longueur totale d'env. 1200 mètres. De nouveaux thèmes de recherche en dehors de la gestion des déchets radioactifs s'y sont ajoutés, comme le stockage du CO₂ en sous-sol ou la fonction des roches argileuses comme couche de couverture des gisements d'hydrocarbures.

L'IFSN participe avec ses propres projets de recherche au projet Mont Terri depuis la création du laboratoire souterrain. Au fil du temps, des thèmes s'y sont ajoutés progressivement, comme la manière dont différents processus (hydrauliques, thermiques, chimiques ou mécaniques) interagissent lors du transport des matières radioactives à travers la roche. Les travaux sont réalisés avec différents groupes de recherche et divers partenaires au projet.

Le laboratoire souterrain peut être visité en groupes durant la semaine et les samedis. Des informations sur les visites guidées se trouvent sur le site :





La recherche de sites appropriés pour des dépôts pré-suppose de bien connaître le sous-sol. Les données et les connaissances peuvent être acquises par un large spectre d'études en sciences de la terre. De telles analyses peuvent causer des dommages à la roche d'étude (comme par exemple avec des forages). La roche peut toutefois aussi être passée au crible, par exemple par des méthodes d'analyse géophysiques (sismologie) non destructives. D'autres connaissances sont obtenues par les géologues sur la base d'affleurements. Ces derniers sont des endroits où la roche d'étude apparaît à découvert.

Un facteur important pour la sécurité d'un dépôt en couches géologiques profondes est l'intégrité des roches qui confinent les déchets radioactifs. Des méthodes d'analyse ne générant aucun dommage à la roche sont donc très importantes. Des analyses sismiques permettent justement aux spécialistes d'avoir une image précise du sous-sol.

Le principe des mesures sismiques s'apparente au sonar des bateaux. À partir d'une **source de signaux** (dynamitage, vibrations), des **oscillations** sont émises dans le sous-sol. Ces dernières se diffusent sous forme de vagues. À la limite de deux **couches géologiques**, les oscillations sont reflétées et enregistrées par des **stations de mesure** situées à la surface. En se basant sur la durée des oscillations au travers du sous-sol, un ordinateur calcule à quelle profondeur se situe cette couche géologique de réflexion. L'évaluation de nombreuses mesures similaires permet de déterminer les structures géologiques dans le sous-sol.

Le procédé de mesure sismique est appliqué depuis plusieurs décennies dans les domaines de la géologie les plus divers. C'est notamment le cas pour la recherche de matières premières (pétrole, gaz naturel et eau souterraine entre autres), pour les études de surfaces de construction ou de sites pollués, ou encore pour l'estimation de dangers naturels. Les spécialistes peuvent donc s'appuyer sur une expérience importante. La résolution des structures géologiques et des paramètres physiques du sous-sol dépend pour beaucoup du dispositif de mesure. Avec les méthodes sismiques actuelles, une résolution de l'ordre de grandeur de dix mètres peut être atteinte dans le domaine de profondeur d'un dépôt en couches géologiques profondes.

D'autres méthodes employées en géophysique sont des procédés de mesure gravimétriques (mesure de la gravité locale), électriques, électromagnétiques ou magnétiques. Pour obtenir une image complète des structures géologiques et des propriétés physiques du sous-sol, il est d'usage d'employer différentes analyses complémentaires des sciences de la terre.

Les méthodes géophysiques autorisent un enregistrement spatial à grande échelle du sous-sol à étudier. Mais, la sismologie en trois dimensions (3D) ne permet de mesurer que les temps écoulés jusqu'à la réapparition d'un signal à la surface. Les forages supplémentaires aident à convertir les temps obtenus avec la sismologie 3D en données sur la profondeur. Pour cela, la position exacte des couches peut être déterminée dans les forages, et la vitesse des ondes

Le sous-sol est passé au crible

Mesure sismique

Tout comme un sondeur acoustique, les spécialistes examinent le sous-sol avec des mesures sismiques. Les oscillations émises à partir d'une source de signaux sont reflétées sur une couche géologique. Le mouvement reflété est enregistré à la surface par des stations de mesure. La durée permet de calculer la profondeur de la couche géologique.

Est-ce que des méthodes d'analyse géophysiques reconnaissent aussi des perturbations importantes sous la roche d'accueil des argiles à Opalinus ?

Dans les couches géologiques, des failles importantes sont généralement identifiables de manière sûre grâce aux mesures sismiques. Ces couches géologiques, tout comme les argiles à Opalinus, appartiennent aux couvertures sédimentaires. Les différentes couches se laissent aisément identifier en raison de leurs propriétés physiques différentes. Des failles dans le socle cristallin situées en dessous de ces couvertures sédimentaires ne sont souvent pas perceptibles. La probabilité que de grandes failles situées sous les argiles à Opalinus mais ne les atteignant pas – elles ne sont plus actives depuis au minimum quelque 170 millions d'années – soient réactivées et continuent leur remontée dans le prochain million d'années est très faible. Mais étant donné que ce cas ne peut être complètement exclu, il est pris en compte dans les analyses de sécurité.

Forum technique sur la sécurité question 32

sismiques peut être mesurée dans les trous de forage. Les forages servent surtout à obtenir des carottes en profondeur et par cela à déterminer les caractéristiques des roches dans le sous-sol.

Pour l'étude des roches meubles proches de la surface, des forages quaternaires sont réalisés. Ces derniers fournissent entre autres des informations sur les processus d'érosion antérieurs.

Les informations obtenues à partir de tous les forages et à l'aide de sismologie constituent la base de données essentielle pour l'évaluation de la sécurité des roches d'accueil et de la géologie. Celles-ci représentent la principale barrière pour le futur dépôt en couches géologiques profondes.



ENSI 33/540: Sicherheitstechnisches Gutachten zum Vorschlag der in Etappe 3 SGT weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete, 2017.

ENSI 33/646: Expertenbericht: Beurteilung der Datenverarbeitung und Interpretation der 2D-Seismik der Nagra.

Nagra: www.nagra.ch/de/seismik.htm

D'où proviennent les déchets radioactifs ?

Centrales



Production d'électricité

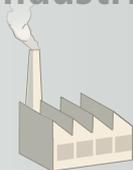


Désaffectation

Médecine



Industrie



Recherche



Déchets hautement radioactifs :

10 % du volume

(y c. déchets moyennement radioactifs à vie longue)

99 %

de la radiotoxicité

1 %

de la radiotoxicité

Déchets faiblement et moyennement radioactifs :

90 % du volume

Déchets radioactifs en Suisse

Le volume des déchets radioactifs se compose pour deux tiers de déchets issus des centrales nucléaires et d'un tiers de déchets provenant de la médecine, de l'industrie et de la recherche. Environ 10 % du volume total sont des déchets hautement radioactifs comprenant quelque 99 % de la radiotoxicité.

Des déchets suisses sont-ils exportés à l'étranger ?

Selon la loi sur l'énergie nucléaire, les déchets radioactifs de la Suisse doivent en principe être stockés en Suisse. L'exportation de déchets en vue de leur stockage n'est possible que dans des cas exceptionnels s'il existe une convention internationale dans ce but. Des éléments combustibles usés ont été envoyés en France (La Hague) et en Angleterre (Sellafield) en vue de leur retraitement jusqu'en 2006. Les déchets correspondants ont été entièrement retournés en Suisse jusqu'à la fin 2016. Depuis 2006, l'exportation en vue du retraitement est interdite en raison d'un moratoire de dix ans. Cette interdiction est ancrée sans limitation dans le temps dans la loi sur l'énergie nucléaire depuis 2018. *Forum technique sur la sécurité, question 23*

En Suisse, deux tiers de déchets radioactifs proviennent des centrales nucléaires et près un tiers de la médecine, de l'industrie et de la recherche. Les déchets sont attribués aux catégories « déchets hautement radioactifs » (DHR), « déchets alpha-toxiques » (DAT) et « déchets faiblement et moyennement radioactifs à vie courte » (DFMR). Les DAT sont stockés avec les DHR ou les DFMR dans un dépôt commun en couches géologiques profondes.

Les éléments combustibles usés des centrales nucléaires et les coquilles vitrifiées issues du retraitement des éléments combustibles appartiennent aux DHR. Le volume des DHR s'élèvera à environ 9500 m³. Il comprendra alors aussi les conteneurs pour stockage en profondeur. Les déchets alpha-toxiques contiennent les déchets du retraitement (p. ex. gaines, embouts des éléments combustibles) ainsi que des déchets d'exploitation moyennement radioactifs issus des centrales nucléaires et des installations de recherche. Le volume des déchets alpha-toxiques sera d'environ 1100 m³. Ensemble, les DHR et les DAT représentent quelque 99 % de la radiotoxicité de tous les déchets radioactifs en Suisse.

Les déchets faiblement et moyennement radioactifs se composent principalement de déchets de l'exploitation et de la désaffectation des centrales nucléaires et des installations de recherche, ainsi que d'applications médicales et industrielles. Le volume total des déchets DFMR s'élèvera à environ 82 000 m³. Ce volume correspond à quelque 86 % du total des déchets. Ils comprennent en même temps environ 1 % de l'ensemble de la radiotoxicité. Les quantités de déchets se basent sur l'hypothèse d'une durée d'explo-

tation des centrales nucléaires actuelles de 60 ans, y compris les déchets liés à leur désaffectation.

Jusqu'à leur stockage dans des dépôts en couches géologiques profondes, les déchets sont entreposés dans des dépôts intermédiaires. Pour chaque conteneur pour dépôt en couches géologiques profondes, l'inventaire des matériaux et la radioactivité contenue sont documentés. En vue d'obtenir un volume de déchets le plus faible possible, des déchets organiques sont par exemple incinérés autant que la technique le permet. Les déchets ne peuvent être transférés dans des dépôts en profondeur que sous une forme solide et stabilisée. Dans cette optique, ils sont fixés dans une matrice de verre, ciment ou bitume par exemple.

Les conteneurs pour le transport et l'entreposage des déchets hautement radioactifs sont quant à eux conçus pour contrer d'éventuels incidents liés au transport ou à leur manipulation. Ces conteneurs de transport, par exemple les conteneurs castor, ne sont pas appropriés pour le stockage en profondeur en raison de leur taille. Les éléments combustibles usés et les déchets vitrifiés du retraitement sont donc conditionnés avant leur stockage en profondeur dans la « cellule chaude » de l'installation de conditionnement. Au terme de ce processus, les déchets se trouvent dans des conteneurs aptes au stockage final. Des fûts de déchets faiblement et moyennement radioactifs seront transférés dans des conteneurs en béton avec des parois épaisses.

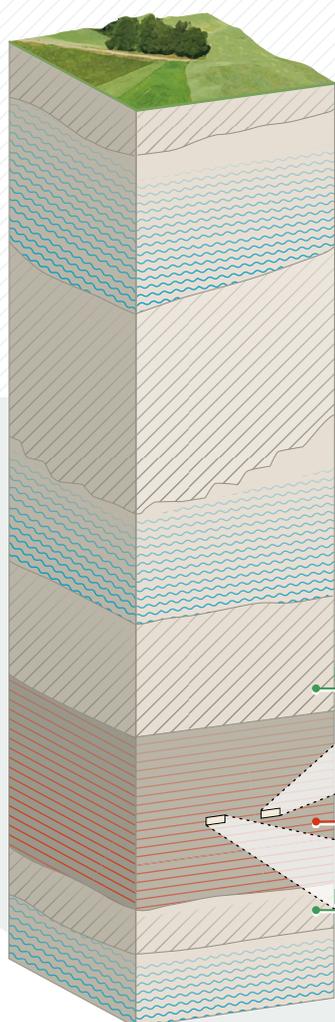


NTB 16-01: Entsorgungsprogramm 2016 der Entsorgungspflichtigen, Nagra, Wettingen.

ENSI (2020): Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management – Seventh National Report of Switzerland, 2020.

Notions importantes:

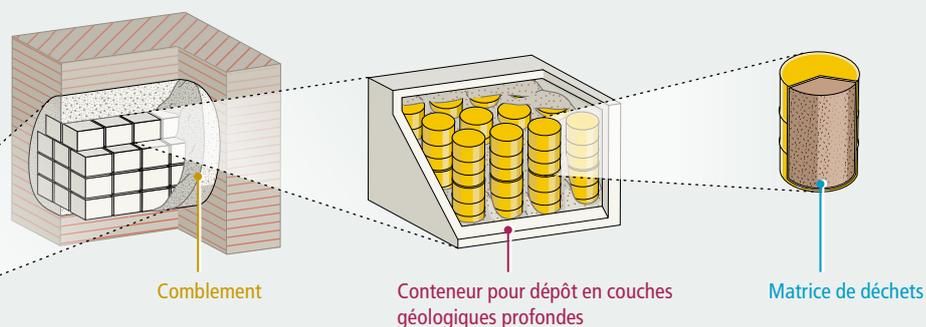
- *Radioactivité* : caractéristique d'une matière déterminée de se transformer sans influence externe et d'émettre par-là un rayonnement électromagnétique (γ) ou des particules (α , β)
- *Radiotoxicité* : mesure pour le potentiel de risque à la santé en raison du rayonnement de substances radioactives



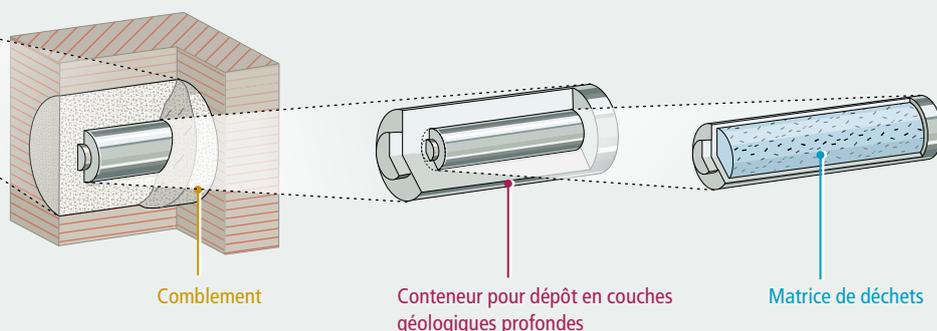
Barrières multiples

Une combinaison de barrières techniques et naturelles doit retenir le plus possible de radionucléides pendant une longue période. Pour les déchets hautement radioactifs (DHR), des barrières techniques plus compliquées que celles pour déchets faiblement et moyennement radioactifs (DFMR) sont nécessaires.

Dépôt en couches géologiques profondes DFMR



Dépôt en couches géologiques profondes DHR



Dans un dépôt en couches géologiques profondes, des barrières techniques et naturelles ralentissent la libération des nucléides. Elles limitent en effet leur transport dans la roche environnante. Les barrières se chargent de la sécurité passive. Cela signifie que le dépôt ne doit pas être entretenu et surveillé activement à long terme.

LES BARRIÈRES TECHNIQUES

Matrice de déchets

Les déchets hautement radioactifs sont fixés dans une matrice solide. Pour les éléments combustibles usés, c'est le combustible lui-même difficilement soluble qui fait office de matrice. Les déchets issus du retraitement sont quant à eux fondus dans du verre. Le combustible et le verre retiennent les substances radioactives. Ces deux éléments se dégradent par ailleurs très lentement dans un dépôt en couches géologiques profondes. Les déchets faiblement et moyennement radioactifs sont

aussi fixés dans une matrice solide. Le plus souvent, il s'agit de verre, de ciment ou de bitume.

Conteneur pour dépôt en profondeur

Le conteneur pour dépôt en couches géologiques profondes contient les déchets. Il les protège contre une dissolution trop rapide. Pour les déchets hautement radioactifs, le concept de stockage actuel prévoit l'utilisation de conteneurs d'une épaisseur de 15 cm. Ces conteneurs doivent garantir le confinement des déchets sur plusieurs milliers d'années. Durant cette période, une grande part des déchets radioactifs se désintègre. En outre, les substances produites par la corrosion des conteneurs en acier sont capables de lier les radionucléides par des réactions chimiques. Les fûts de déchets faiblement et moyennement radioactifs sont conditionnés dans des conteneurs en béton avec des parois épaisses. Du mortier est ensuite coulé dans les cavités restantes.

Des barrières retiennent les substances radioactives

Pourquoi la Suisse veut-elle stocker ses déchets radioactifs dans une roche argileuse ?

Au niveau mondial, de nombreux pays poursuivent des projets pour la construction de dépôts en couches géologiques profondes. Les pays sélectionnent à ce titre différentes roches d'accueil telles que le sel (Etats-Unis), les roches cristallines (Finlande, Suède) ou des roches argileuses (Suisse, Belgique, France). Il n'existe pas de roche d'accueil « idéale ». La géologie d'un pays détermine les conditions-cadres géologiques. Il n'y a par ailleurs en Suisse aucun gisement de sel approprié. Des gisements argileux appropriés au stockage en profondeur sont en revanche à disposition. Les projets dans les différents pays sont ainsi conçus en fonction de la roche d'accueil de telle sorte qu'ils atteignent les objectifs de protection exigés. *Forum technique sur la sécurité, questions 25, 30, 82, 130*

Les conteneurs ne se désintègrent-ils pas plus rapidement que les déchets radioactifs ?

Les déchets radioactifs à stocker contiennent des radionucléides avec des périodes de désintégration (périodes radioactives) significativement plus longues que la durée de vie attendue d'un conteneur pour dépôt en couches géologiques profondes. Le concept de sécurité d'un dépôt en couches géologiques profondes repose ainsi sur un principe de barrières multiples. Il s'agit d'une série de barrières techniques et naturelles empêchant la diffusion de radionucléides ou la limitant à un niveau inoffensif. La durée de vie limitée d'une barrière est déjà prise en compte dans le concept de dépôt. *Forum technique sur la sécurité, question 11*

Afin que les radionucléides ne pénètrent l'espace de vie des êtres humains qu'après une longue période et dans des quantités insignifiantes, certaines propriétés entre autres des barrières naturelles et des domaines d'implantation présentent des avantages :

- Épaisseur et profondeur suffisantes aussi bien des roches d'accueil que des roches encaissantes
- Pores de la roche petits au travers desquels l'eau ne peut pas ou ne peut guère se déplacer
- Capacité de la roche à colmater elle-même des fissures
- Stabilité géologique sur le long terme
- Pas ou peu de faille verticale (déformation)
- Capacité à lier les substances radioactives

Comblement

Pour le comblement des galeries de stockages pour déchets hautement radioactifs, un matériau argileux gonflant (bentonite) est employé. Celui-ci remplit alors complètement les galeries de stockage par sa capacité de gonflement. Il colmate lui-même des fissures qui surviennent. Par ailleurs, il possède une très faible perméabilité à l'eau. La plupart des radionucléides adhèrent très bien à la bentonite. Leur transport s'en trouve ainsi ralenti. Par-là, une grande partie des radionucléides se désintègre avant qu'ils ne traversent la bentonite. Pour les déchets faiblement et moyennement radioactifs, les galeries d'accès sont comblées avec du mortier de ciment. La plupart des radionucléides adhèrent aussi bien à ce matériau.

LES BARRIÈRES NATURELLES

Roches d'accueil et roches encaissantes

La **roche d'accueil** sert à l'aménagement de la zone de

stockage du dépôt en couches géologiques profondes. Elle empêche ou ralentit la diffusion des substances radioactives. Des **roches encaissantes** peu perméables peuvent se trouver en dessus et en dessous de la roche d'accueil. Celles-ci contribuent également au confinement des déchets radioactifs. Les couches géologiques contribuant au confinement de substances radiologiques (roches d'accueil et roches encaissantes) sont désignées comme « zone de confinement géologique ». Tout comme les barrières techniques, les barrières naturelles retiennent passivement les radionucléides.

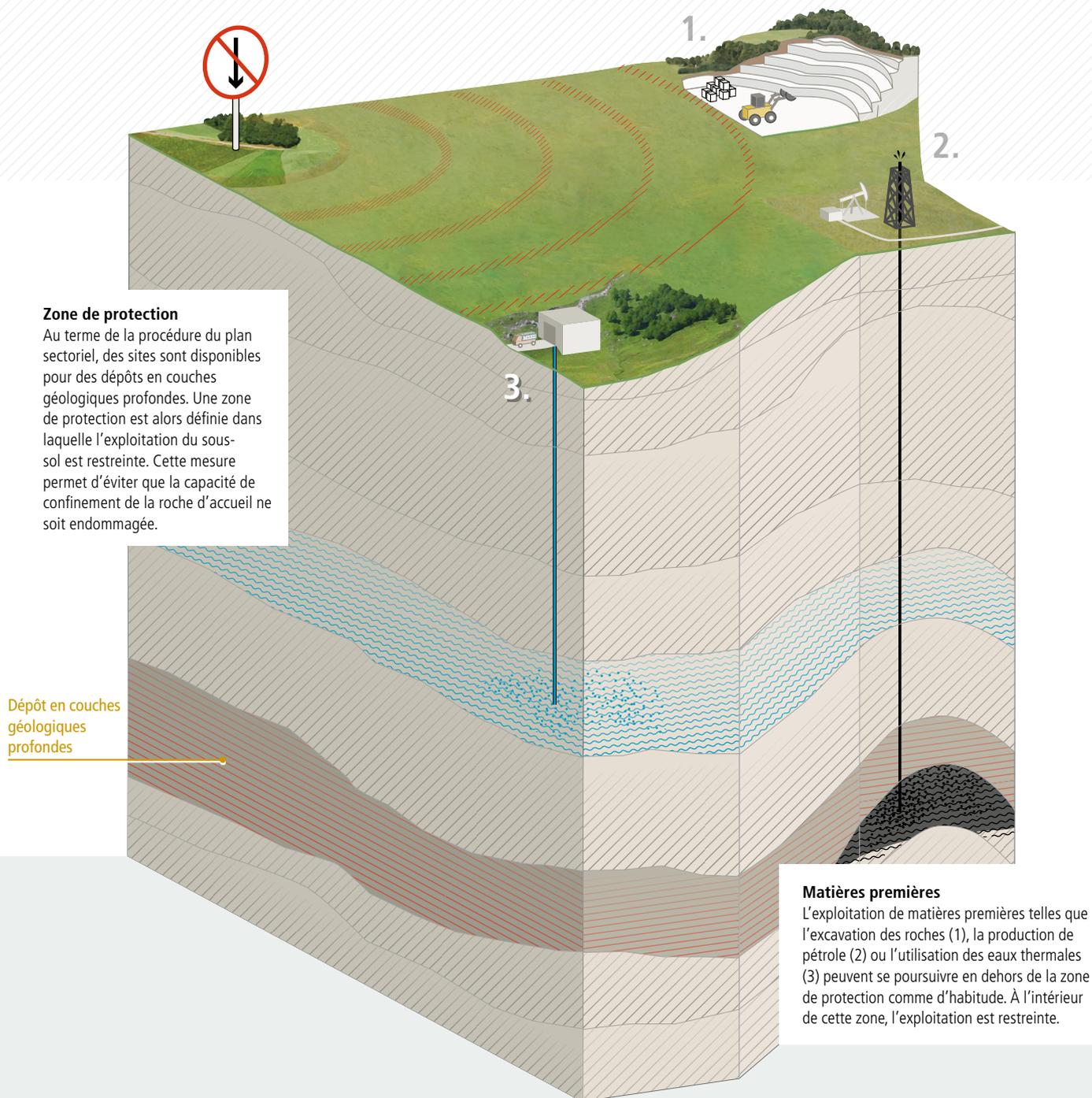


ENSI 33/540: Sicherheitstechnisches Gutachten zum Vorschlag der in Etappe 3 SGT weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete, 2017.

NTB 14-01: Sicherheitstechnischer Vergleich und Vorschlag der in Etappe 3 weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete, Nagra, 2014.

HSK 35/99: Gutachten zum Entsorgungsnachweis der Nagra für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle (Projekt Opalinuston), Kap. 4, HSK, 2005.

HSK-AN-5262: Entsorgungsnachweis: Etappe auf einem langen Weg, HSK, 2005.



Des conflits d'exploitation potentiels sont :

- l'extraction de pierres de construction, de sel et de minerais
- l'extraction de charbon, gaz naturel et pétrole
- l'exploitation d'eaux minérale ou thermique
- l'utilisation de la géothermie (par exemple avec des sondes appropriées)
- le stockage du CO₂ dans le sous-sol géologique (appelé séquestration de CO₂)

La sécurité par la distance : zone de protection autour du dépôt en couches géologiques profondes

Pour la sécurité d'un **dépôt géologique en profondeur**, il est important que la roche d'accueil, comme barrière géologique, reste la plus intacte possible. Cette disposition peut toutefois aboutir à des conflits quant à de futures utilisations du sous-sol géologique. En se basant sur le plan sectoriel « Dépôts en couches géologiques profondes », des domaines sont jugés appropriés lors de la recherche de sites lorsqu'ils sont moins susceptibles de rencontrer des conflits d'exploitation à long terme.

Les exploitations du sous-sol géologique pratiquées aujourd'hui sont déjà évitées dans le cadre de la recherche de sites. Il s'agit par exemple de sources d'eaux thermales ou minérales. En vue d'éviter de futurs conflits d'exploitation, il est par ailleurs important pour la sécurité à long terme qu'aussi peu de matières premières que possible se trouvent dans les environs du site de stockage en profondeur. Cela doit permettre d'empêcher que les générations futures courent des risques en raison de l'extraction de matières premières. Cette garantie doit subsister même après de longues périodes, lorsque la connaissance de l'existence du dépôt en profondeur a disparu.

Par l'exploitation de matières premières sur de grands espaces proches de la surface ou par la construction de tunnels pour le trafic, la roche située plus en profondeur peut se trouver perturbée. Une telle perturbation peut accroître

la perméabilité de la roche. Des substances radioactives pourraient par-là se diffuser plus facilement. Il en résulterait une influence négative sur la sécurité à long terme du dépôt en couches géologiques profondes.

En vue de garantir la sécurité d'un dépôt en couches géologiques profondes, une zone de protection sera définie avec le site au terme de la procédure du plan sectoriel (autorisation générale). L'exploitation possible du sous-sol s'en trouvera ainsi restreinte. La zone de protection comprend toutes les parties du dépôt en profondeur, les ouvrages d'accès depuis la surface inclus. Des interventions directes dans le sous-sol profond ne sont pas permises dans cette zone de protection. Elles pourraient en effet endommager les barrières géologiques et ouvrir des voies de transport pour les substances radioactives entre les différentes couches géologiques. C'est pourquoi des interventions dans le sous-sol des régions d'implantation potentielles ont déjà été limitées au début de l'étape 2 du plan sectoriel. Par conséquent, des forages à partir d'une certaine profondeur ne sont plus autorisés.



ENSI 33/649: Präzisierungen der sicherheitstechnischen Vorgaben für Etappe 3 des Sachplans geologische Tiefenlager, 2018.

OFEN (2011): Plan sectoriel « Dépôts en couches géologiques profondes » – Conception générale, OFEN (révision du 30 novembre 2011).

Des limitations d'exploitation doivent-elles déjà être prononcées aujourd'hui dans les domaines d'implantation proposés ?

La protection des domaines d'implantation géologiques proposés doit être garantie jusqu'à ce qu'ils soient écartés de la recherche de sites. Les cantons sont responsables de l'aménagement du territoire et émettent en conséquence les autorisations nécessaires pour l'exploitation du sous-sol. Pour éviter une péjoration de la sécurité des domaines d'implantation géologiques, les cantons ont été contraints, à travers l'inscription des domaines d'implantation à la fin de l'étape 1 par le Conseil fédéral, de tenir compte des domaines de protection pour les autorisations. L'IFSN a mis à la disposition des cartes avec des limitations de la profondeur pour les forages et les activités dans le sous-sol. Ces limitations de la profondeur ont été adaptées à la fin de l'étape 2. *Forum technique sur la sécurité, question 36*

Le risque radiologique à long terme d'un dépôt en couches géologiques profondes

Un dépôt en couches géologiques profondes ne pourra pas retenir toutes les substances radioactives en tenant compte de milliers d'années. Mais alors que les radiations directes des déchets radioactifs sont déjà stoppées grâce à quelques mètres d'épaisseur de roche, des parties des substances radioactives peuvent se diffuser de telle sorte qu'elles arrivent en quantités très faibles tout de même dans l'espace de vie de l'être humain. Un tel « rejet » fait partie du concept de dépôt en profondeur. Un confinement complet sur de longues périodes n'est certes pas possible, mais il n'est surtout pas nécessaire. Les couches géologiques retiendront en effet la plus grande partie des matières alors que leur radioactivité décline avec le temps.

Pour protéger l'être humain et l'environnement, l'exposition aux rayonnements supplémentaire à la surface due à un dépôt en profondeur ne doit pas dépasser une certaine limite. Concernant la dose de rayonnements par personne due à des substances radioactives d'un dépôt en profondeur, l'IFSN a fixé une limite annuelle de 0,1 millisievert. En comparaison de la dose reçue annuellement par chaque Suisse et Suisseuse, 0,1 millisievert est une valeur faible. La dose de radiations moyenne de la population suisse s'élève actuellement à 6,0 millisieverts par année (figure à droite).

Comme des précédents calculs de l'IFSN le montrent, ce critère de protection sera respecté dans les domaines d'implantation proposés. Ces calculs tiennent compte d'une multitude de cas comme une fuite précoce dans les conteneurs pour dépôt en couches géologiques profondes ou une faille apparue dans les roches environnantes au dépôt suite à un séisme.



OFSP (2018): Etat des connaissances sur les risques des radiations ionisantes aux faibles doses.

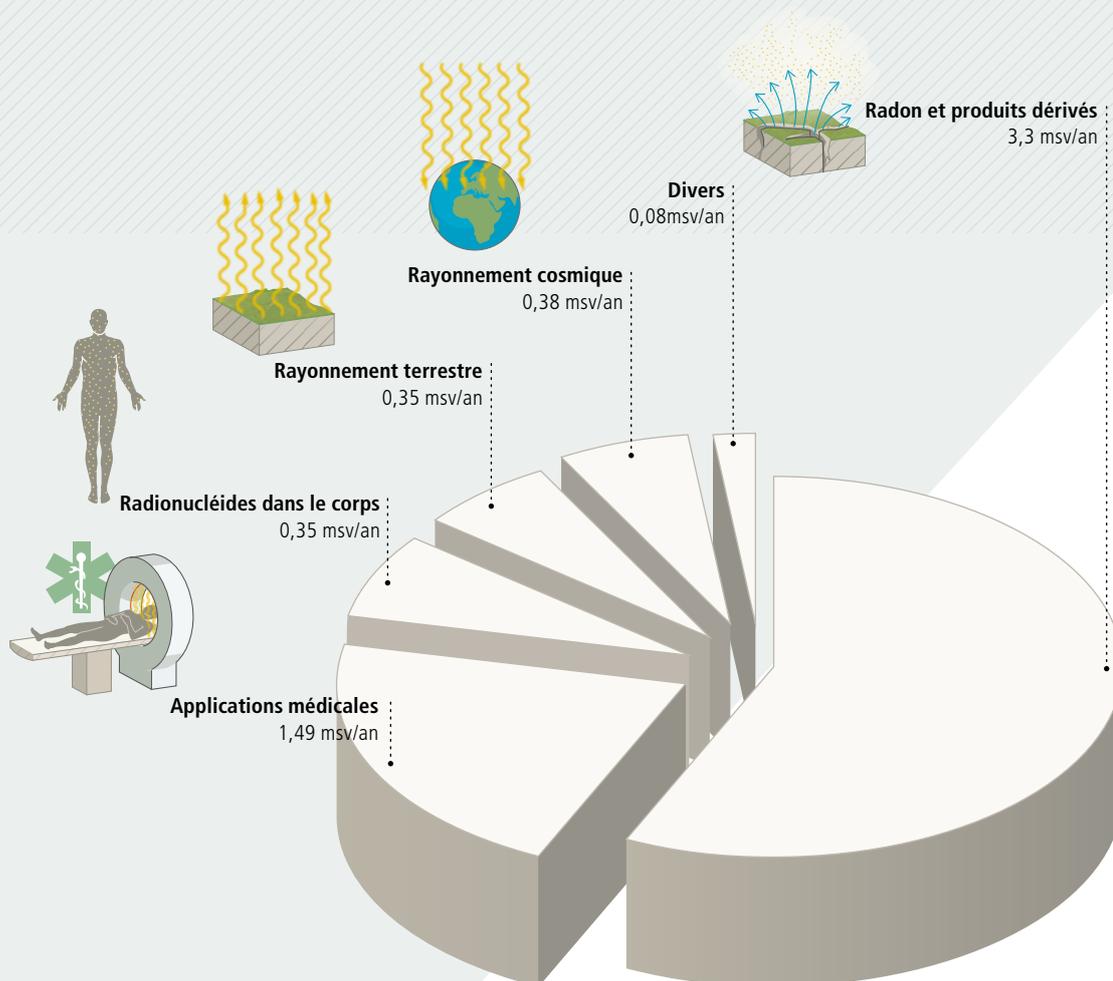
ENSI 33/540: Sicherheitstechnisches Gutachten zum Vorschlag der in Etappe 3 SGT weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete, 2017.

Canupis (2011): Krebserkrankungen bei Kindern in der Nähe von Kernkraftwerken: Ergebnisse der CANUPIS-Studie, Universität Bern (www.canupis.ch).

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation UNSCEAR 2012: Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation, Report to the General Assembly with Scientific Annexes, United Nations, New York (2015).

Quel est l'effet de l'éventuelle exposition aux radiations de 0,1 millisievert par an sur le risque de cancer ?

La dose représentative pour le risque radiologique est la dose effective établie en sievert (Sv). On tient compte d'une part de l'efficacité biologique de la radiation concernée et, d'autre part, de la sensibilité relative des organes. Avec cette très faible dose de 0,1 millisievert, l'augmentation calculée du risque de cancer, comparé au risque spontané dans la population de souffrir d'un cancer, est si faible qu'elle ne peut pas être prouvée. *Forum technique sur la sécurité, question 39*

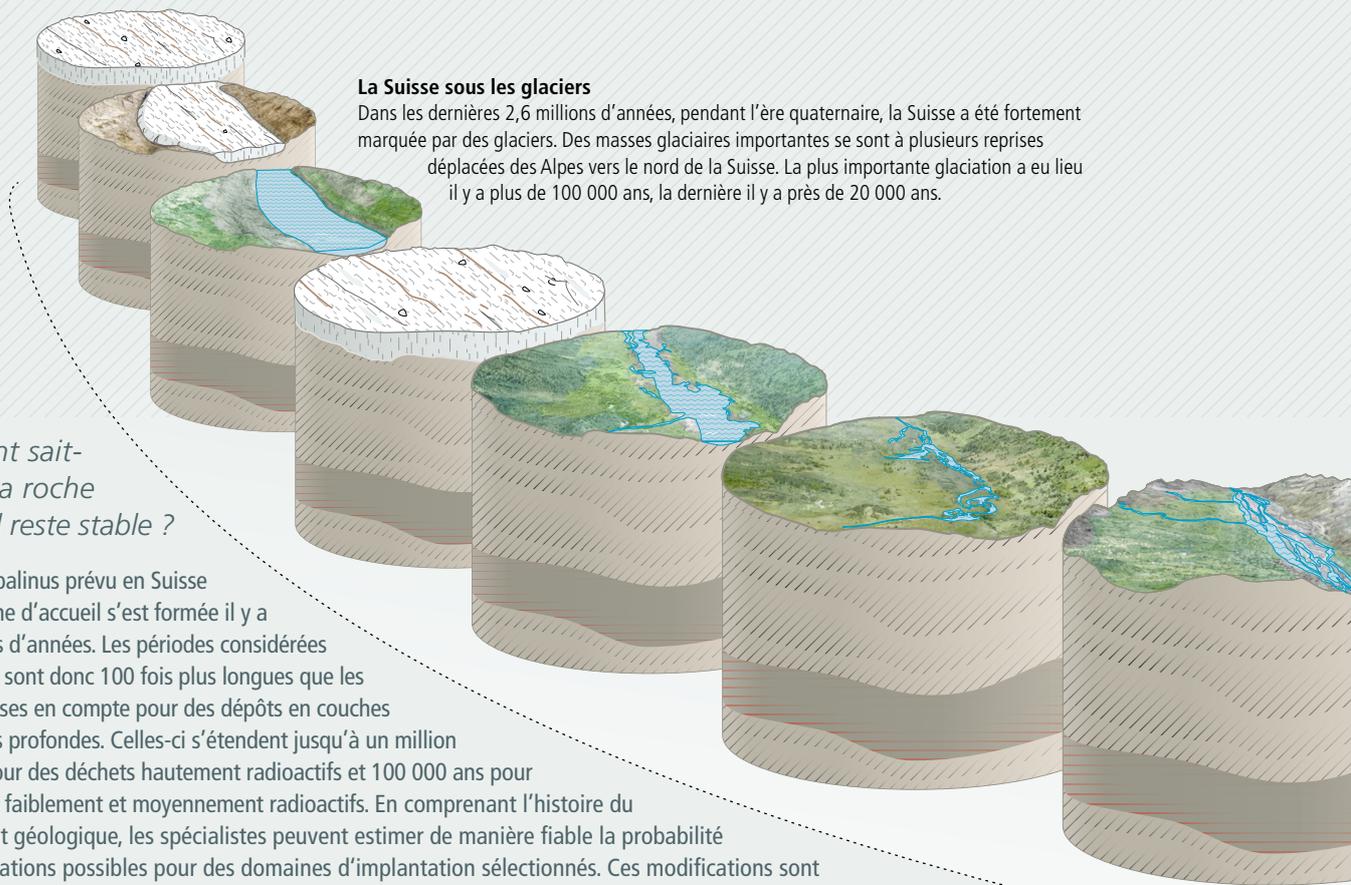


Constamment exposés

Les êtres humains sont partout et sans arrêt exposés aux rayonnements ionisants. La dose annuelle moyenne s'élève en Suisse à 6,0 millisieverts (mSv) pour la population. La plus grande partie se compose de gaz rares radioactifs présents naturellement. Il s'agit du radon et de ses produits dérivés (3,3 mSv). 1,49 mSv provient des applications médicales (radiographie, tomographie, etc.). Les rayonnements cosmiques et terrestres contribuent pour leur part à 0,73 mSv à la dose annuelle en Suisse. Des radionucléides naturellement présents dans le corps génèrent une dose de 0,35 mSv par année. D'autres expositions aux radiations liées à la recherche, à l'industrie, aux installations nucléaires, à la médecine, aux biens de consommation et objets de la vie quotidienne ainsi que les radio-isotopes artificiels dans l'environnement sont de 0,08 mSv. Cette valeur de 0,1 mSv par an ne doit également pas être dépassée par un dépôt en profondeur après la fermeture.



OFSP (2020): Radioactivité de l'environnement et doses de rayonnements en Suisse.

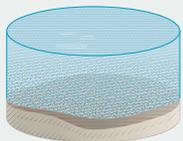


La Suisse sous les glaciers

Dans les dernières 2,6 millions d'années, pendant l'ère quaternaire, la Suisse a été fortement marquée par des glaciers. Des masses glaciaires importantes se sont à plusieurs reprises déplacées des Alpes vers le nord de la Suisse. La plus importante glaciation a eu lieu il y a plus de 100 000 ans, la dernière il y a près de 20 000 ans.

Comment sait-on que la roche d'accueil reste stable ?

L'argile à Opalinus prévue en Suisse comme roche d'accueil s'est formée il y a 172 millions d'années. Les périodes considérées en géologie sont donc 100 fois plus longues que les périodes prises en compte pour des dépôts en couches géologiques profondes. Celles-ci s'étendent jusqu'à un million d'années pour des déchets hautement radioactifs et 100 000 ans pour des déchets faiblement et moyennement radioactifs. En comprenant l'histoire du changement géologique, les spécialistes peuvent estimer de manière fiable la probabilité des modifications possibles pour des domaines d'implantation sélectionnés. Ces modifications sont par exemple des déplacements de la croûte terrestre, l'altération, les processus d'érosion et de soulèvement. Les spécialistes sont également en mesure d'évaluer si, à long terme, une atteinte à la capacité de confinement de la roche d'accueil est à attendre ou pas dans la période prise en compte. *Forum technique sur la sécurité, questions 10, 15, 45, 47, 70, 108, 122 et 137*



Formation de la roche d'accueil, l'argile à Opalinus

Il y a 172 millions d'années, la Suisse était couverte par une mer tropicale peu profonde. De l'argile s'est déposée dans la mer qui s'est consolidée au fil du temps. Il en a résulté les actuelles argiles à Opalinus. Ce nom provient de l'ammonite « *leioceras opalinum* » qui a été conservée jusqu'à aujourd'hui sous forme de fossile

La Suisse est sous l'eau

Archaeopteryx



Il y a 200 millions d'années

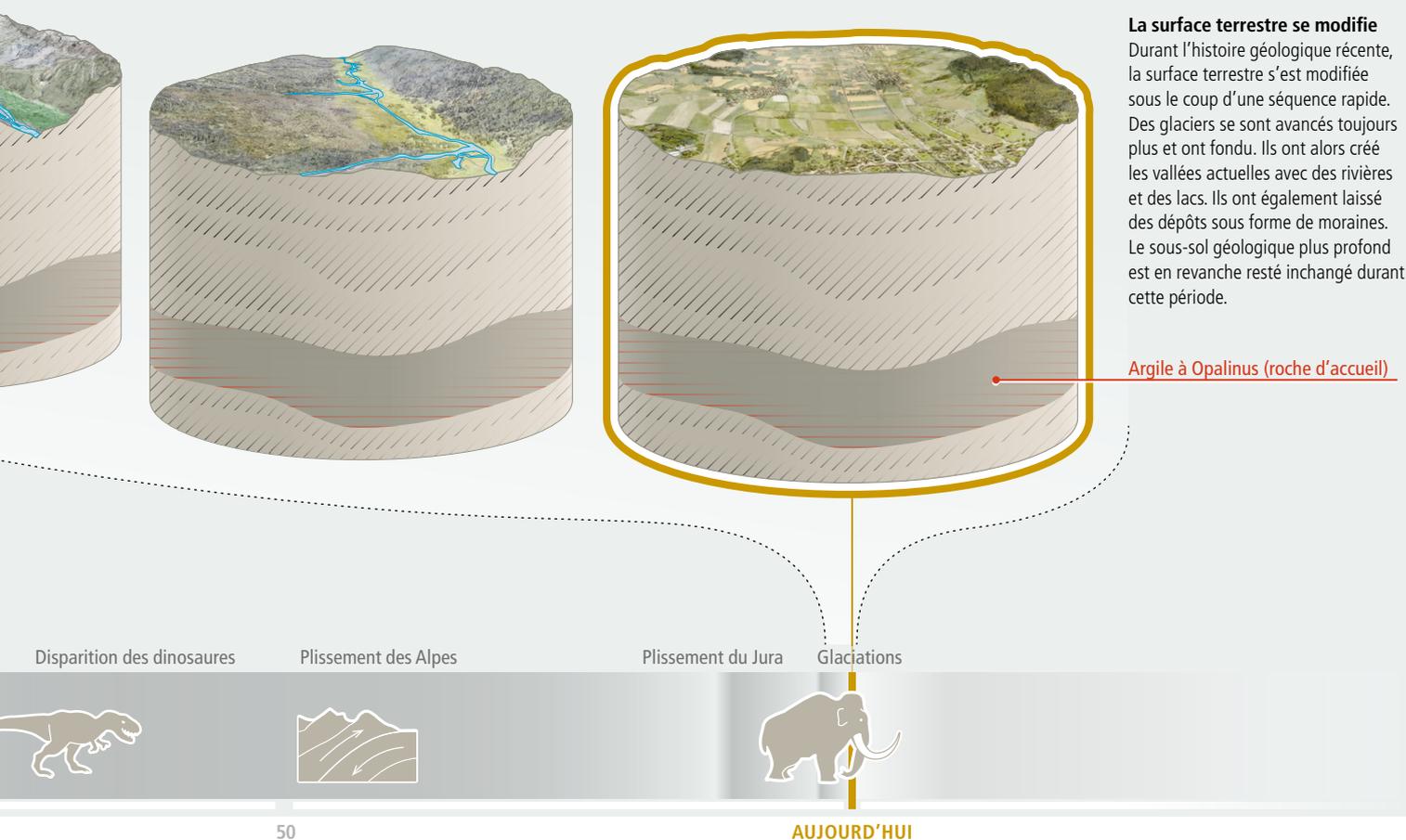
150

100

La géologie met très longtemps à se modifier. La terre s'est formée il y a plus de 4600 millions d'années, les couches d'argile à Opalinus se sont déposées il y a 172 millions d'années. Le plissement des Alpes, donnant lieu aux énormes massifs actuels, résulte de l'empilement d'anciens sédiments de grands fonds marins. Ce processus a eu lieu sur plusieurs millions d'années. Il ne peut être saisi qu'au travers d'une sorte d'« accélérateur historique ». Par contre, les conditions à la surface peuvent se modifier très rapidement, à cause du changement climatique. Les habitats humains les plus anciens en Suisse n'ont été construits qu'après la dernière période glaciaire et datent en effet de quelques milliers d'années seulement.

Étant donné que les déchets radioactifs provoquent sur des périodes très longues des radiations nocives pour la santé, le sous-sol est le seul à même de garantir pendant une longue période la sécurité nécessaire lors du stockage des déchets radioactifs. Le Groupe d'experts pour les modèles de gestion des déchets radioactifs (EKRA) l'avait constaté au terme de sa comparaison de différentes options de gestion des déchets radioactifs en 2000. Il avait alors effectué ses travaux sur mandat du Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC). Son rapport relève : « En l'état actuel des connaissances, le stockage géologique final est la seule méthode de gestion des déchets radioactifs qui

Combien de temps dure un million d'années ?



correspond aux exigences de sécurité à long terme (jusqu'à plus de 100 000 ans) ». Personne ne sait exactement ce qui se passera dans le prochain million d'années. Mais les géologues sont capables d'estimer ce qui peut se produire. Le concept de gestion en couches géologiques profondes tient compte des changements futurs possibles.



EKRA (2000): Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle – Schlussbericht, UVEK.

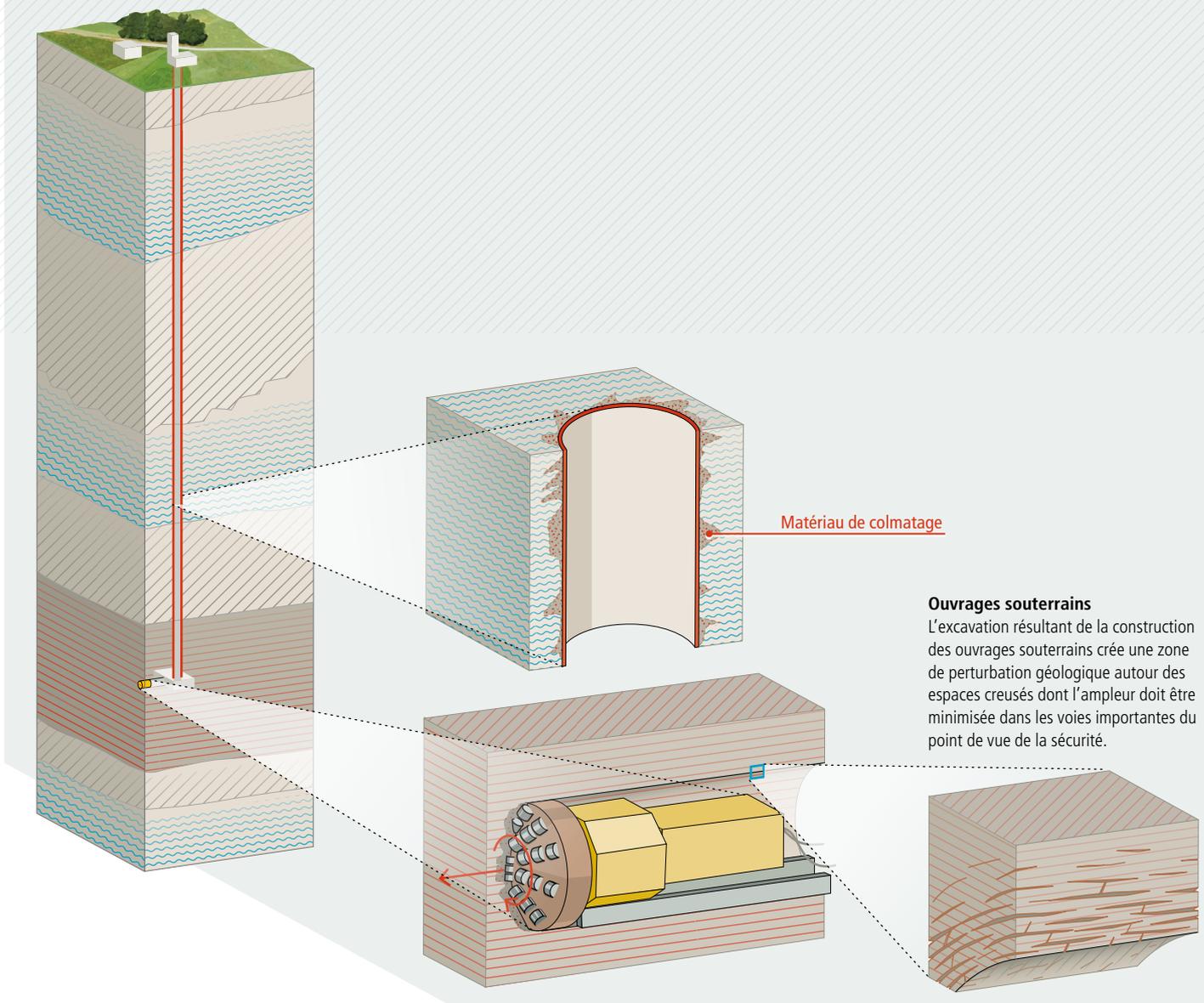
Labhart, T. (2004): Geologie der Schweiz.

ENSI 33/540: Sicherheitstechnisches Gutachten zum Vorschlag der in Etappe 3 SGT weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete, 2017.

Pourquoi un million d'années ?

L'IFSN exige pour un dépôt en couches géologiques profondes que son développement soit évalué sur une période d'un million d'années. Dans quel contexte faut-il replacer cette exigence ? Le développement géologique dans la profondeur du dépôt est dominé principalement par les changements des plaques tectoniques. Les mouvements horizontaux des plaques engendrent des soulèvements ou des affaissements. Il est possible de faire une prévision de ce développement avec des incertitudes acceptables sur une période d'un million d'années. La radiotoxicité des déchets radioactifs stockés atteindra bien avant un million d'années à nouveau un niveau de rayonnement tel qu'on le trouve dans la nature.

Forum technique sur la sécurité, questions 27, 38, 45, 137



Ouvrages souterrains

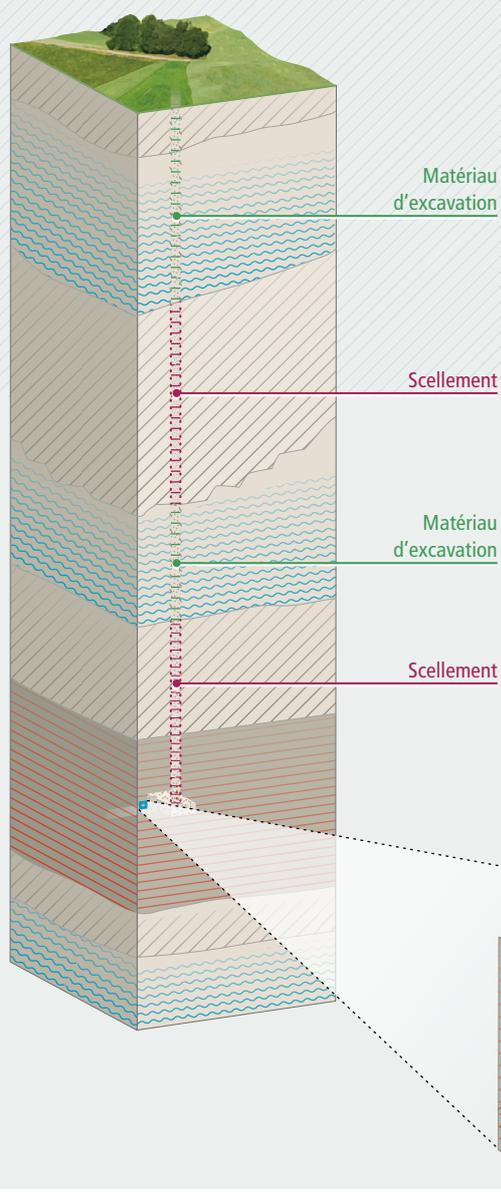
L'excavation résultant de la construction des ouvrages souterrains crée une zone de perturbation géologique autour des espaces creusés dont l'ampleur doit être minimisée dans les voies importantes du point de vue de la sécurité.

Aspects importants de l'évaluation de la faisabilité technique des ouvrages souterrains :

- Faisabilité avec les méthodes actuelles appropriées de creusement et d'aménagement
- Minimisation des endommagements liés au creusement dans les roches d'accueil et encaissantes– Prévention et maîtrise des risques géologiques durant la construction et l'exploitation
- Stabilité des cavités et durabilité des ouvrages durant la durée d'utilisation prévue

Lors de l'élaboration du projet et de la construction d'un dépôt en couches géologiques profondes en Suisse, il est possible de s'appuyer sur une expérience de plusieurs années issue des projets de construction souterraine. Les propriétés rocheuses et géologiques, les éventuelles couches aquifères et les zones de perturbation géologique le long des voies à parcourir jouent un rôle important. Pour garantir la sécurité à long terme d'un dépôt en couches géologiques profondes (confinement à long terme et rétention des substances radioactives), il faut prendre en compte des aspects supplémentaires.

La zone de stockage se trouve à une profondeur variant de 500 à 900 mètres dans la roche d'accueil, l'argile à Opalinus. Cette roche confine et retient les substances radioactives comme une barrière naturelle. Les ouvrages souterrains au niveau du dépôt doivent donc être construits de manière à minimiser les endommagements de l'argile à Opalinus provoqués par les travaux de construction et à préserver l'effet barrière de la roche d'accueil de la manière la plus complète possible. Pour cela, des procédés appropriés pour le creusement et l'aménagement d'ouvrages sont nécessaires.



Exigences élevées à la technique de construction

Comblement et scellement essentiels pour la sécurité à long terme

Les travaux d'avancement pour la création des ouvrages d'accès traversent différentes formations géologiques jusqu'à la roche d'accueil. Pour garantir la sécurité à long terme, il est important que les galeries et les cavernes de stockage, mais aussi les voies d'accès soient bien comblées et scellées. A la limite de la couche avec la zone de confinement géologique, toutes les voies d'accès sont dotées, après le comblement, d'un système de scellement spécial en tant que barrière hydraulique. Les scellements permettent aussi de réduire les zones de perturbation apparaissant autour des espaces creusés, grâce à des mesures appropriées. La bentonite est prévue par exemple comme matériau de scellement. Elle gonfle et colmate l'accès lors du contact avec de l'eau ou de l'humidité de la roche. Ce processus de saturation dure probablement quelques centaines d'années. *Forum technique sur la sécurité, question 28*

Fermeture des chambres de stockage

Lors de l'emmagasinement des déchets, les galeries et cavernes de stockage sont comblées et fermées par un système de scellement.

Granulat de bentonite gonflant

Pour les ouvrages d'accès qui sont créés comme accès principaux ou secondaires ou comme ouvrage de ventilation à travers les couches géologiques superposées pour accéder à l'argile à Opalinus, il est important de prévenir ou de maîtriser les infiltrations d'eau durant la construction et l'exploitation du dépôt. Les infiltrations d'eau dans les couches superposées ne doivent pas affecter les propriétés de l'argile à Opalinus et des roches encaissantes situées au-dessus et contribuant au confinement des substances radioactives, ni non plus l'exploitation. Les dommages résultant des travaux de construction doivent aussi être minimisés. L'élaboration du projet et l'exécution des travaux sont soumises aux exigences correspondantes.

Les galeries et cavernes de stockages sont comblées après le stockage des déchets et fermées avec un système

de scellement. Les matériaux et techniques utilisés à cet effet doivent répondre à différentes exigences, entre autres à l'exigence d'étanchéité. Lors de la fermeture de tout le dépôt, les voies d'accès sont aussi comblées et des systèmes de scellement sont créés à la limite de la couche avec les roches encaissantes ou l'argile à Opalinus. Les voies d'accès situées au-dessus sont comblées avec un matériau de sorte que la séparation initiale des différents niveaux d'eaux souterraines soit rétablie.



ENSI 33/540: Sicherheitstechnisches Gutachten zum Vorschlag der in Etappe 3 SGT weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete, 2017.

NTB 16-01: Entsorgungsprogramm 2016 der Entsorgungspflichtigen, Nagra, 2016.

NTB 02-02: Projekt Opalinuston: Konzept für die Anlage und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers, Nagra, 2002.

HSK 35/99: Gutachten zum Entsorgungsnachweis der Nagra (Projekt Opalinuston), HSK, 2005.

Ce que l'on voit d'un dépôt en couches géologiques profondes à la surface

Bâtiment d'exploitation

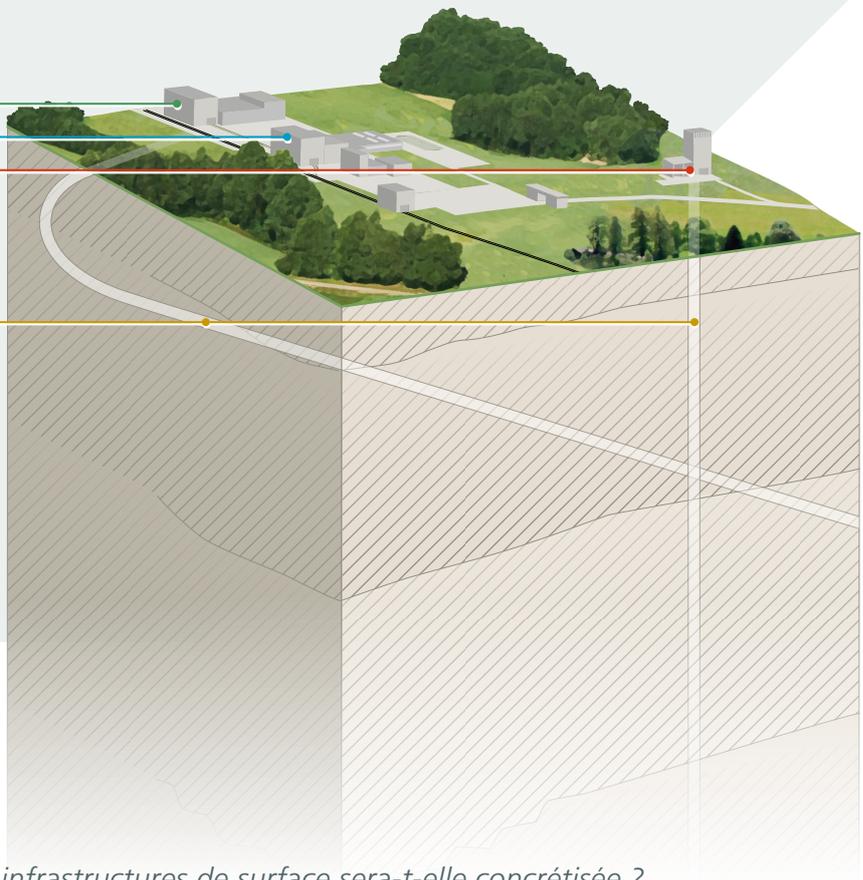
Installation de conditionnement

Chevalements de puits

Rampe / puits

Une surface équivalente à onze terrains de football

L'infrastructure de surface d'un dépôt géologique en profondeur pour déchets hautement radioactifs nécessite selon les estimations de la Nagra une surface de 200 x 400 mètres. Sur cet emplacement se trouve l'infrastructure nécessaire à la construction et à l'exploitation du dépôt.



À quel moment la planification des infrastructures de surface sera-t-elle concrétisée ?

Dans le cadre de la procédure du plan sectoriel, les traits principaux des infrastructures de surface (emplacement, taille et disposition des plus importantes constructions) sont élaborés en vue de l'autorisation générale. Ce processus a lieu lors des étapes 2 (emplacement) et 3 (taille et disposition des plus importantes constructions) en étroite collaboration avec les régions. Après la définition fin 2018 des locaux pour l'infrastructure de surface dans trois régions d'implantation, la Nagra a publié au mois de mai 2019 des propositions pour l'infrastructure de surface, y compris les infrastructures de surface et les éventuelles installations d'accès auxiliaires, pour la discussion avec les régions d'implantation. La disposition détaillée ainsi que l'aménagement des bâtiments en vue de la construction ont lieu avec l'élaboration des documents pour l'autorisation de construire. Celle-ci n'est prévue que vers 2040 (dépôts DFMR) et 2045 (dépôt DHR), donc plusieurs années après le choix définitif de sites. *Forum technique sur la sécurité, question 60*

Les infrastructures de surface seront un signe visible d'un dépôt en couches géologiques profondes. Elles sont l'entrée du dépôt en profondeur. Les ouvrages d'accès et le bâtiment d'exploitation s'y trouvent également. Les déchets radioactifs y sont réceptionnés, contrôlés et conditionnés. En tant qu'installation nucléaire, les infrastructures de surface relèvent des exigences de sécurité strictes de la loi sur l'énergie nucléaire.

Lors de la phase de construction, le terrain offre de la place pour la construction des installations pour rampes et puits. La surface nécessaire pour les infrastructures de surface est estimée par la Nagra à environ 200 x 400 mètres pour un dépôt de déchets hautement radioactifs. Pour un dépôt de déchets faiblement et moyennement radioactifs, la surface est évaluée à 150 x 350 mètres. La surface nécessaire pour un dépôt de déchets radioactifs correspond ainsi à environ onze terrains de football. Si un puits est construit, un **chevalement** sera érigé sur l'emplacement ou à proximité. Le site exact du puits sera fixé plus tard avec l'autorisation de construire.

Durant la phase d'exploitation, les déchets sont réceptionnés et transférés dans **l'installation de conditionnement**. Le transport dans un dépôt en couches géologiques profondes peut être assuré via des **rampes ou des puits**. Ce travail est assuré à l'aide de véhicules ou d'ascenseurs.

En outre, des **bâtiments d'exploitation** sont nécessaires. Des bureaux, des laboratoires, des ateliers ainsi que la ventilation souterraine y sont aménagés. Pour les déchets hautement radioactifs, l'installation de conditionnement contient une « cellule chaude » dans laquelle les déchets sont transférés des conteneurs de transport vers les conteneurs pour dépôt en couches géologiques profondes. Les déchets y sont également préparés en vue de l'emménagement. Des travaux semblables sont déjà accomplis aujourd'hui dans le dépôt intermédiaire central à Würenlingen.

Des routes, et si possible des voies de chemin de fer, rendent le terrain accessible. Le transport des biens nécessaires pour la construction et l'exploitation (gravier, ciment) est assuré par la route et le rail. C'est également le cas pour les matériaux d'excavation résultant de la construction du dépôt en couches géologiques profondes, les déchets à stocker et le matériau de comblement.

Pour la population locale, les principaux désagréments sont attendus lors de la phase de construction. Par exemple, des inconvénients liés au bruit et à la poussière peuvent survenir en raison du transport de la roche excavée. L'évacuation du matériau d'excavation n'a lieu si possible que par rail. Pour la phase de construction, la Nagra compte environ deux à trois trains par jour pour l'évacuation du matériau d'excavation et la livraison de gravier et de ciment. Suite à la phase de construction, un trafic moins important est attendu avec le transport des déchets radioactifs. La Nagra part de l'idée que le transport sera réalisé par environ 5 trains par an (soit quelque 20 véhicules de transport de charges lourdes par an) avec des déchets hautement radioactifs ou 25 trains par an (soit quelque 400 camions par an) avec des déchets faiblement et moyennement radioactifs. En plus de cela, deux ou trois trains par semaine sont attendus avec du matériel d'exploitation (conteneurs vides pour dépôt en couches géologiques profondes, matériau d'excavation, matériau de comblement, etc.).

L'IFSN évaluera les mesures de protection et de sécurité des exploitants et veillera, entre autres par des inspections, à ce que leur application corresponde aux exigences légales.



NTB 19-08: Vorschläge zur Konkretisierung der Oberflächeninfrastruktur der geologischen Tiefenlager Teil 1: Einführung und Grundlagen Teil 2: Standortspezifische Vorschläge, Nagra, 2019.

NTB 02-02: Projekt Opalinuston: Konzept für die Anlage und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers, Nagra, 2002.

Dangers durant le stockage

La réalisation et l'exploitation d'ouvrages souterrains sont liées à d'éventuels dangers. Ces dangers doivent être pris en compte lors de la planification ; où cela est judicieux et réalisable, des mesures doivent être prévues pour y remédier. Deux grands dangers possibles sont ici traités en détail, soit l'infiltration d'eau et l'incendie.

Les infiltrations d'eau peuvent représenter une menace pour un grand nombre d'ouvrages souterrains. C'est pourquoi cette menace doit être prise en compte durant la phase de planification. Le risque d'infiltration d'eau entraînant une inondation de l'installation doit être réduit à une probabilité d'occurrence aussi faible que possible, par des mesures adéquates.

Pour l'aménagement d'un dépôt en couches géologiques profondes, des ouvrages d'accès (tunnels et/ou puits) sont construits à travers différentes formations géologiques, partiellement aquifères. Une infiltration d'eau dans les ouvrages d'accès durant la phase de construction ou d'exploitation ayant un impact sur le niveau de stockage et des conséquences indésirables sur l'argile à Opalinus, la roche d'accueil, (p. ex. gonflements et formation de boues) doit être évitée ou contrôlée par des mesures techniques et logistiques. Il faut empêcher une infiltration d'eau depuis la surface (intempéries, inondation), par le choix du site approprié pour les infrastructures de surface ainsi que par des mesures constructives, le cas échéant. Un choix approprié du tracé des ouvrages d'accès permet de réduire les risques d'infiltration d'eau venant de la roche. Des mesures d'aide à la construction éprouvées (p. ex. abaissement temporaire du niveau de la nappe phréatique, gel temporaire d'une zone rocheuse, mesures d'injection lors du creusement) peuvent

être adoptées. Un étanchement complet de l'ouvrage ne peut être entièrement atteint et l'eau de la nappe phréatique doit éventuellement être pompée vers le haut lors de la phase de construction et d'exploitation. L'extension des ouvrages d'accès ainsi que la qualité des matériaux de construction et la construction de l'ouvrage jouent un rôle important.

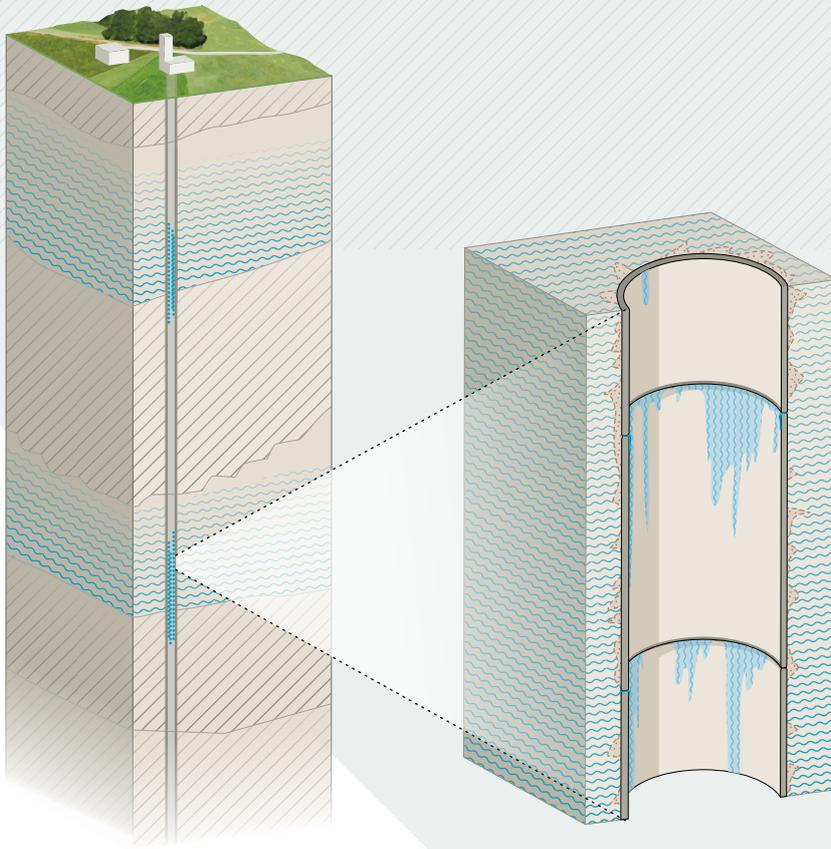
L'IFSN a formulé des exigences correspondantes imposées aux installations souterraines dans sa directive ENSI-G03. Les infrastructures de surfaces et d'accès annexes d'un dépôt en couches géologiques profondes sont conçues de manière à empêcher une infiltration d'eau dans un tel dépôt depuis la surface.

Selon l'ordonnance sur l'énergie nucléaire, les incendies sont des défaillances qui doivent être surveillées dans un dépôt en couches géologiques profondes. Il faut adopter des mesures de protection correspondantes. Les incendies dans les installations souterraines sont évités par des mesures de protection contre les incendies ou l'ampleur du dommage causé est minimisée. De telles mesures comprennent notamment la réduction de la charge calorifique (moins de substances combustibles si possible), la répartition des installations souterraines en compartiments coupe-feu, séparés par des portes coupe-feu, et l'aménagement de voies d'évacuation clairement signalées.



Richtlinie ENSI-G03: Geologische Tiefenlager, Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, 2020.

ENSI 33/170: Anforderungen an die bautechnischen Risikoanalysen und an ergänzende Sicherheitsbetrachtungen für die Zugangsbauwerke in Etappe 2 SGT, 2013.



Infiltration d'eau

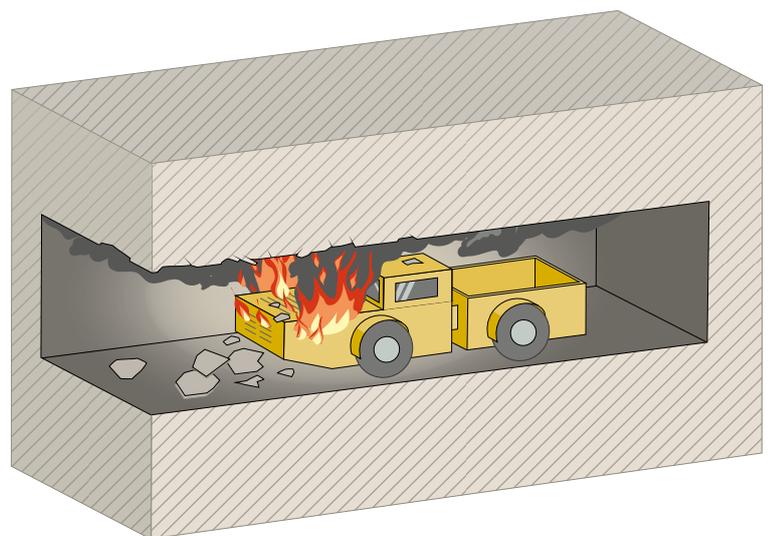
Les ouvrages d'accès, de la surface jusqu'en profondeur, traversent des couches aquifères. Par conséquent, les infiltrations d'eau importantes au niveau des couches aquifères et l'eau pénétrant en profondeur sont un éventuel danger durant la construction et l'exploitation de l'installation.

Forum technique sur la sécurité, questions 84, 90 et 150

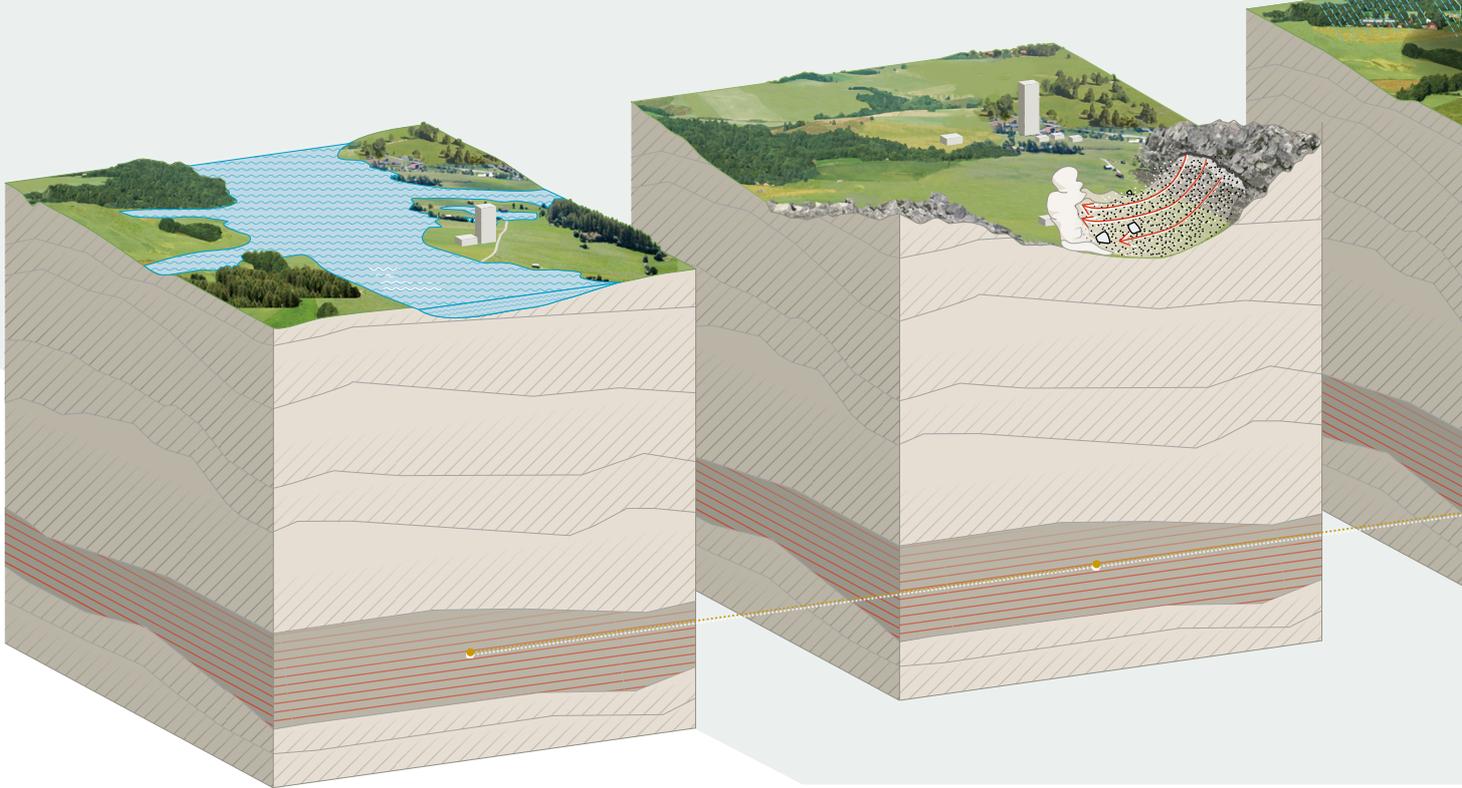
Incendie dans un dépôt en couches géologiques profondes

Un incendie de véhicule s'est produit en février 2014 dans le dépôt final américain WIPP. Un véhicule servant à traverser les galeries a été fortement endommagé et une partie de la couverture de sel de la galerie s'est effondrée. Des enseignements pour le stockage futur peuvent être tirés de tels événements.

Forum technique sur la sécurité, questions 90, 112, 115 et 129



Dangers naturels pour les infrastructures de surface



Éviter ou maîtriser

Contrairement au dépôt en couches géologiques profondes situé à plusieurs centaines de mètres de profondeur, les infrastructures de surface sont directement exposées à des dangers naturels. Ces dangers à la surface peuvent être pris en compte de deux manières : soit on les évite lors du choix du site – c'est le cas pour les crues ou les chutes de pierres – soit les infrastructures de surface sont construites de sorte qu'elles maîtrisent les dangers existants, comme des tempêtes.

Un **dépôt** se compose d'infrastructures de surface et de constructions souterraines. Lors de la phase d'exploitation, les infrastructures de surface sont soumises à un large spectre de dangers naturels. Il va des crues aux glissements de terrain, des éboulements aux avalanches jusqu'aux tempêtes et séismes. Pendant l'exploitation d'un dépôt en couches géologiques profondes, les infrastructures de surface doivent donc être parées contre de possibles dangers.

Un grand nombre de dangers naturels comme des crues, des avalanches, des éboulements ou des glissements de terrain ne produisent leurs effets que dans des endroits particuliers. Les zones d'inondation dépendent de la topographie et des



Comment traite-t-on les effets d'évènements naturels tels que des séismes, des inondations ou des glissements de terrain par rapport à un dépôt en couches géologiques profondes?

Un dépôt en couches géologiques profondes est une installation nucléaire. Selon l'ordonnance sur l'énergie nucléaire, des mesures de protection doivent être prises pour les installations nucléaires. Ces mesures visent des défaillances avec une origine interne ou externe à l'installation. Des défaillances dont l'origine est à l'extérieur de l'installation peuvent par exemple être déclenchés par des séismes ou des inondations. Selon la directive ENSI-G03, une analyse de sécurité complète doit être menée pour la phase d'exploitation. Cette analyse doit établir la vraisemblance qu'un évènement survienne. La Nagra doit par conséquent apporter les démonstrations de sécurité relatives à la maîtrise de ces conséquences sur les infrastructures de surface et ouvrages souterrains. Ces démonstrations concernent les phases d'exploitation et de post-fermeture. Tous les effets doivent être limités de sorte que les exigences des autorités soient respectées.

Forum technique sur la sécurité, questions 19, 56, 70, 76, 79, 88, 99 et 127

cours d'eau. Les avalanches et les éboulements nécessitent une pente minimale. Ces zones de dangers sont en grande partie connues et sont représentées sur les cartes de dangers naturels des cantons. Lors du choix d'un site pour des infrastructures de surface, ces zones peuvent être évitées.

Si les dangers ne peuvent pas être évités, comme pour le vent, la foudre ou les séismes, les infrastructures de surface doivent être protégées au moyen de mesures architecturales. Les accès aux constructions souterraines doivent en particulier être dimensionnés de sorte qu'une entrée d'eau dans le dépôt en couches géologique profonde en provenance de la surface soit empêchée.

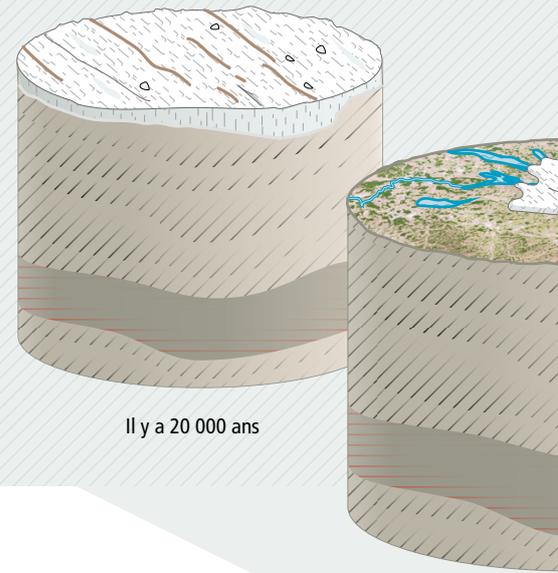
A la fin de l'exploitation, les infrastructures de surface sont démantelées. L'accès aux ouvrages souterrains sera fermé de manière à assurer la sécurité contre les dangers de la surface.



Richtlinie ENSI-A05: Probabilistische Sicherheitsanalyse (PSA): Qualität und Umfang, ENSI, 2009.

Richtlinie ENSI-G03: Geologische Tiefenlager, Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, 2020.

L'érosion et la perspective à long terme



Il y a 20 000 ans

L'air, l'eau et la neige contribuent à l'érosion des montagnes et creusent des vallées. Les géologues considèrent généralement l'ablation de la surface comme une érosion. Les processus d'érosion se déroulent habituellement très lentement. C'est pourquoi nous ne le percevons que rarement. Mais, lors d'événements tels que des éboulements, des coulées de boue ou des inondations, il devient visible que les choses peuvent évoluer de façon très dynamique à la surface.

L'érosion est étroitement liée aux mouvements verticaux du sous-sol. Le sous-sol géologique est considéré comme un soulèvement ou un affaissement. Les zones de soulèvement sont touchées à long terme par l'érosion, tandis que les zones d'affaissement sont généralement comblées. Par exemple, c'est ainsi que toute la région alpine est soulevée actuellement (jusqu'à 1,5 millimètre par an). Par contre, la région du Jura s'affaisse. Au nord de la Suisse, des soulèvements de quelques dixièmes de millimètres par an sont notés, ce qui correspond à une érosion de quelques centaines de mètres en un million d'années. L'érosion se produit principalement à travers le réseau hydrographique, mais aussi par les glaciers pendant les glaciations.

Même si l'impression domine que l'érosion se déroule très lentement, elle peut engendrer une ablation successive des couches couvrant le dépôt en profondeur. Une érosion persistante causerait un amincissement de l'enveloppe rocheuse protectrice, jusqu'à ce que le dépôt soit exposé au grand jour. Un dépôt en couches géologiques profondes

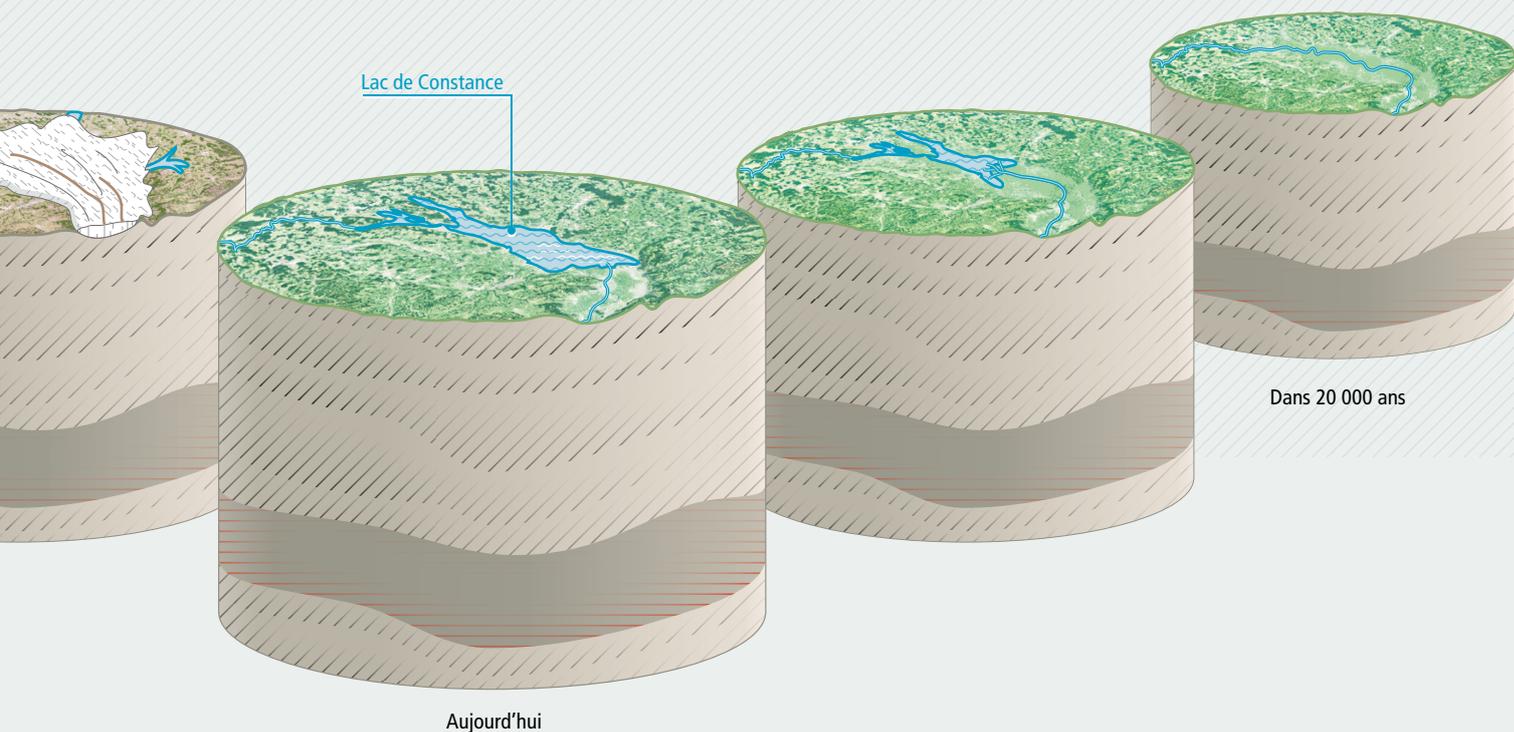
doit donc être protégé à long terme de l'érosion et placé à des profondeurs de plusieurs centaines de mètres sous la surface de la terre.

Pour tenir compte des effets de l'érosion dans le cadre de la recherche de sites pour un dépôt en couches géologiques profondes, le critère de sécurité 2.2 « Erosion » est ancré dans le plan sectoriel « Dépôts en couches géologiques profondes ». Ce critère permet d'évaluer chaque proposition de site en relation avec la question de savoir si la sécurité du dépôt sera affectée par l'érosion pendant la période concernée. L'exposition d'un futur dépôt en couches géologiques profondes à l'érosion varie selon le site et la profondeur. Les glaciers qui avançaient depuis les Alpes durant les glaciations ont-ils atteint le site ? Comment les tracés fluviaux ont-ils évolué au fil du temps ? Pourquoi ont-ils changé ?

Le réseau fluvial pourrait-il changer pendant une longue période ? Quelle était l'ampleur de l'érosion du sol dans le passé ? Dans quelle mesure les différents types de roches s'érodent plus ou moins facilement à long terme ? Il faut apporter une réponse résiliente à ces questions et à bien d'autres pour l'évaluation du critère 2.2 « Erosion ». À cet effet, plusieurs travaux de recherche sont effectués par la Nagra et l'IFSN.

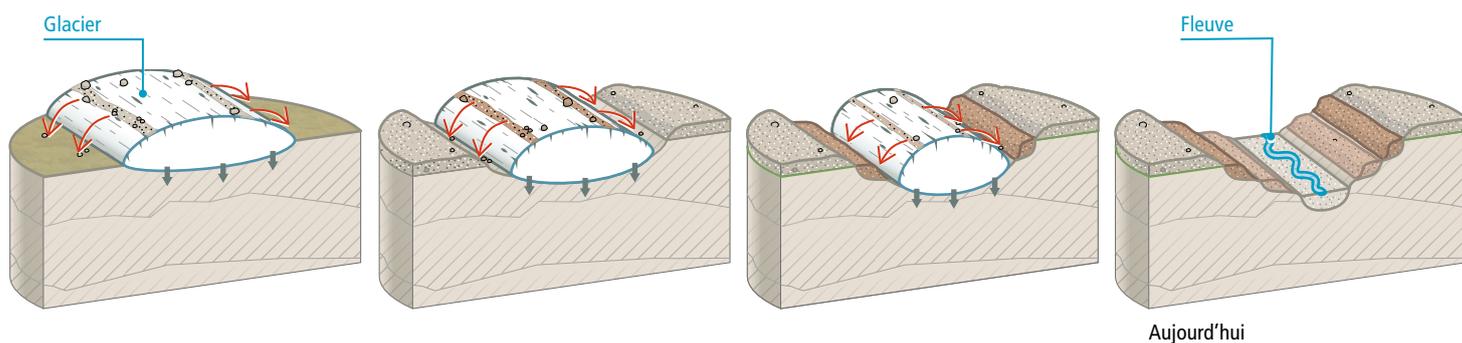


ENSI 33/453: Prüfung Langzeitstabilität und Quartärgeologie. Expertenbericht zuhanden des ENSI im Rahmen der Beurteilung des Vorschlags von mindestens zwei geologischen Standortgebieten pro Lagertyp, Etappe 2, Sachplan geologische Tiefenlager (H.-R. Graf, S. Frank, Dr. von Moos AG), September 2015.



Formation et comblement des lacs

Des parties du nord de la Suisse étaient recouvertes de glace pour la dernière fois il y a 20 000 ans. L'avancée du glacier du Rhin et le dégel tardif de la neige conduisirent à la formation du lac de Constance. L'actuel lac de Constance est toutefois recomblé lentement à partir de l'embouchure du Rhin et on peut estimer que les débris des Alpes transportés avec le Rhin auront recomblé le lac dans 20 000 ans.



Développement des vallées

Pour pouvoir évaluer l'érosion des couches géologiques, il faut comprendre le développement des vallées. Des exemples du nord de la Suisse permettent de montrer avec quelles formes de vallées se sont créées, quand et comment. Les vallées sont approfondies par les glaciers et les fleuves en plusieurs étapes. Simultanément, des sédiments typiques se sont créés durant chaque phase d'érosion. Ces sédiments se sont déposés entre les vallées et les flancs de vallées. Si on connaît l'âge de ces sédiments, on peut déduire la vitesse du creusement des vallées.

Lorsque la terre tremble

La plaque continentale africaine bouge chaque année de quelques millimètres en direction de l'Europe avec des forces énormes. Les Alpes sont par exemple un signe visible de cette collision. Les tremblements de terre en Suisse sont liés à ce mouvement. Des tensions dans la croûte terrestre se forment sur de longues périodes. Elles se libèrent sous la forme de tremblements de terre. À cette occasion, deux parties de roches se déplacent soudainement et par à-coups le long d'une zone critique locale, une faille.

Cette libération de tension détermine la distribution géographique des séismes en Suisse. Ainsi, il y a dans les régions géologiquement plus actives comme Bâle, le Valais, la Suisse centrale, la vallée du Rhin saint-galloise, le centre des Grisons et l'Engadine davantage de tremblements de terre que dans d'autres parties du pays.

Le plan sectoriel «Dépôts en couches géologiques profondes» tient compte de l'aléa sismique lors de la recherche de sites. Il contient en effet des critères relatifs à la stabilité à long terme (stabilité des propriétés du site et de la roche) et à la fiabilité des données géologiques (possibilités de caractériser et de prévoir l'évolution géologique à long terme). De cette manière, des zones de failles sont par principe évitées lors du choix des sites. De même, des domaines avec les conditions de sédimentation les plus convenables et une bonne possibilité de caractérisation sont préférés.

Des prévisions sur de futurs tremblements de terre se basent sur des expériences tirées d'événements sismiques. Ceux-ci ont été enregistrés par des sismomètres ou reconstruits sur la base de données historiques. Les dépôts sédimentaires peuvent montrer l'histoire sismique. La situation de failles connues actives et inactives permet aussi de se prononcer sur de futurs tremblements de terre. Les spécialistes partent du principe qu'à l'avenir une majeure partie de la sismicité suivra le modèle connu de séismes et

de failles. Malgré cela, il ne peut pas être exclu qu'un fort tremblement de terre affecte un dépôt en couches géologiques profondes sur la durée retenue d'un million d'années.

Pour ce cas très invraisemblable, une fuite de substances radioactives peut être empêchée par le choix d'une roche d'accueil appropriée, telle qu'une roche argileuse avec des propriétés auto-colmatantes, et la méthode de construction du dépôt en couches géologiques profondes. Il s'agit dans ce cas d'employer des matériaux de scellement et de comblement colmatants. Dans les constructions souterraines comblées, seuls des dommages minimaux sont à attendre en raison de la fonction de soutien du matériau de comblement.

Selon les directives de l'IFSN (notamment l'ENSI-G03 et les précisions des exigences de sécurité pour l'étape 3 du plan sectoriel « Dépôts en couches géologiques profondes »), les infrastructures de surface d'un dépôt en couches géologiques profondes doivent résister aux effets d'un séisme lors de la phase d'exploitation. Elles sont à dimensionner en conséquence. En tant qu'installations nucléaires, elles relèvent des mêmes exigences strictes en matière de sécurité parasismique que les centrales nucléaires. Elles doivent aussi être conçues pour un grave tremblement de terre, tel qu'il en survient un tous les 10 000 ans.

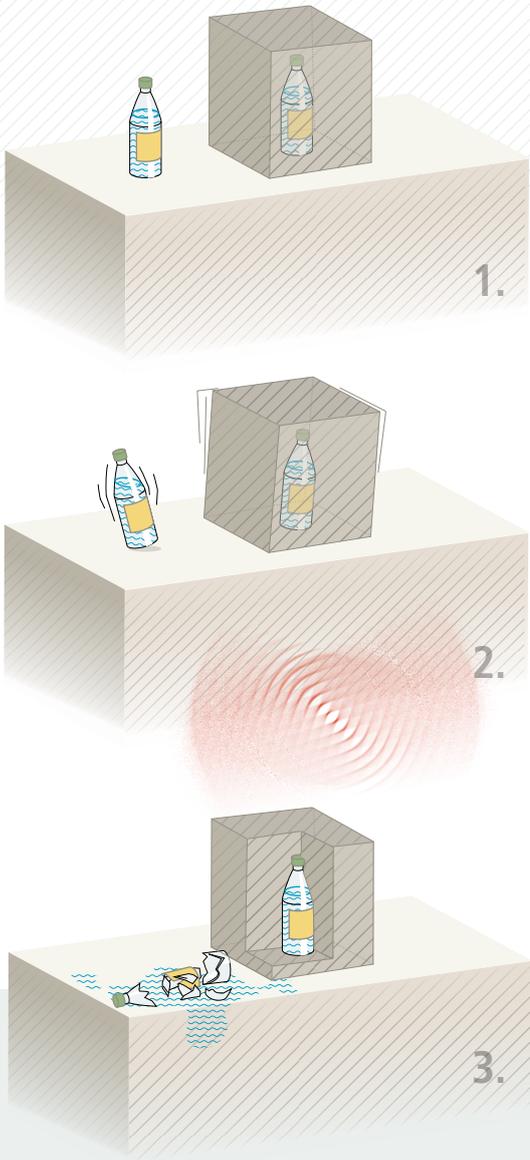


ENSI 33/540: Sicherheitstechnisches Gutachten zum Vorschlag der in Etappe 3 SGT weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete, 2017.

ENSI 33/539: Qualitative Bewertung der optimierten Lagerperimeter in den geologischen Standortgebieten, 2017.

NTB 14-02: Dossier III Geologische Grundlagen: Dossier III Geologische Langzeitentwicklung, Nagra 2014.

Service sismologique suisse : www.seismo.ethz.ch



Essai de vibration

Deux bouteilles de verre se trouvent sur une surface. L'une d'entre elles est à l'air libre, l'autre est bien contenue. Après un tremblement de terre en profondeur, des ondes sismiques atteignent la surface. La bouteille à l'air libre tombe et se casse. La bouteille en verre bien entourée en revanche ne peut pas vaciller librement. Les ondes traversent la bouteille qui n'est pas endommagée. Le même principe est valable pour des déchets radioactifs solidement confinés dans le sous-sol.

Magnitude et intensité

À propos des effets d'un séisme, c'est moins la magnitude que l'intensité de la vibration du sol au poste d'observation qui importe.

La magnitude rend en effet compte de la valeur de l'énergie libérée lors du tremblement de terre. L'intensité en revanche est une échelle pour des dommages possibles. Ainsi, un séisme puissant (d'une magnitude élevée) à une distance importante peut générer moins de dégâts qu'un tremblement de terre faible, mais à proximité du sous-sol.

Comment est-il possible d'assurer pour des dépôts en couches géologiques profondes qu'aucune modification n'intervienne dans le secteur de zones de failles pendant de très longues périodes ?

Les zones de failles présentes dans la roche ont été provoquées par des séismes dans la croûte terrestre. Elles présentent des zones perturbées pouvant être réactivées dans le futur lors d'importantes modifications géologiques. De tels changements dans des zones de failles ne peuvent pas être exclus sur de très longues périodes. Lors de la délimitation et l'identification de domaines d'implantation appropriés, de telles zones perturbées ont pour cela été généralement évitées vu que la perméabilité de l'eau peut être fortement élevée dans le périmètre d'influence des zones de failles. Une distance de sécurité doit donc être respectée pour ces zones.

Forum technique sur la sécurité, question 37

L'eau souterraine

L'eau se trouve dans presque toutes les couches géologiques souterraines. De la surface vers le dépôt en profondeur, les ouvrages d'accès traversent des roches perméables, appelées **couches aquifères**. Ces couches aquifères qui sont proches de la surface, c.-à-d. à l'extrémité supérieure des ouvrages d'accès, doivent être surtout protégées en tant que ressources en eau potable, et à grande profondeur comme réservoirs d'eau thermale et minérale. La protection de la nappe phréatique contre le dépôt en couches géologiques profondes résulte directement de la protection du dépôt en couches géologiques profondes contre l'eau. En empêchant des entrées d'eau et en minimisant le contact avec la nappe phréatique, aucune eau n'est prélevée des sources existantes et la nappe phréatique n'est pas polluée. La loi sur la protection des eaux doit être respectée. L'Office fédéral de l'environnement (OFEV) veille au respect de cette loi.

La phase de construction est en particulier critique en ce qui concerne les entrées d'eau, parce que le sous-sol est ouvert directement pour la première fois. Toutefois, aucun déchet radioactif n'est encore sur place pendant cette période. Durant la phase d'exploitation, les substances radioactives sont complètement enfermées dans les conteneurs de stockage en couches géologiques profondes. Toutes les parties du dépôt sont à long terme comblées et scellées afin de séparer le dépôt en couches géologiques profondes des nappes d'eaux souterraines.

Il y a aussi de l'eau souterraine dans des roches d'accueil et encaissantes autour du dépôt en couches géologiques profondes. Il ne s'agit toutefois pas d'eau souterraine, mais d'eau interstitielle. En effet, ces roches sont tellement denses que l'eau située dans les pores ne peut pas s'écouler librement. Pourtant, les substances dissoutes peuvent se déplacer très lentement dans l'eau interstitielle. C'est alors un processus appelé « diffusion » qui est à l'œuvre. Elles peuvent transporter les substances radioactives jusqu'aux couches aquifères, donc dans l'espace de vie de l'être humain. Ce déplacement n'a lieu que sur quelques centimètres en 1000 ans. Beaucoup de substances radioactives dissoutes dans l'eau peuvent adhérer aux minéraux argileux. Les **roches d'accueil** et **encaissantes** argileuses peuvent ainsi retenir les radionucléides. Si, toutefois, la roche d'accueil est creusée, s'effrite et subit des déformations après une longue période à proximité de la surface, elle perd petit à petit ses propriétés de confinement positives. Elle doit donc se trouver suffisamment en profondeur. De même, les couches géologiques doivent avoir une épaisseur convenable. Les roches d'accueil argileuses ont en outre la capacité de refermer d'elles-mêmes des endroits perméables au fil du temps. Dans le laboratoire souterrain du Mont Terri à St-Ursanne (JU) et dans les tunnels, des espaces humides causés par l'eau interstitielle ont ainsi été suivis après l'ouverture de galeries dans les argiles à Opalinus. Elles s'étaient généralement auto-colmatées quelques mois plus tard.

Ce que l'on sait sur les déplacements d'eau dans le sous-sol

Le stockage en couches géologiques profondes de déchets radioactifs fait l'objet de recherches internationales depuis des décennies. Des connaissances concernant les eaux souterraines profondes proviennent de l'exploration gazière et pétrolière depuis le début de l'industrialisation déjà. D'autres informations concernant la formation du sous-sol et la localisation des eaux souterraines sont fournies par les forages et les sources d'eau thermale, les forages de géothermie, ainsi que les recherches de la Nagra (par exemple des forages avec des tests de perméabilité, des mesures sismiques, des analyses d'échantillons d'eau). La Nagra a compilé ces résultats dans son rapport NTB 14-02, Dossier V. Les déplacements d'eau dans le sous-sol peuvent aujourd'hui être bien compris et décrits, grâce à ces connaissances.

Forum technique sur la sécurité, questions 10, 18-21, 25, 34, 49, 53, 61, 84, 86, 92, 102, 120, 124, 127

La protection à long terme de la nappe phréatique contre les substances radioactives est assurée par les objectifs et critères de protection de la loi sur l'énergie nucléaire. Selon cette loi, la radioactivité ne doit pas entraîner une augmentation significative de l'exposition naturelle aux radiations de l'homme et de l'environnement. En outre, l'IFSN exerce une fonction de surveillance parce que les dépôts en couches géologiques profondes sont soumis à la loi sur l'énergie nucléaire.

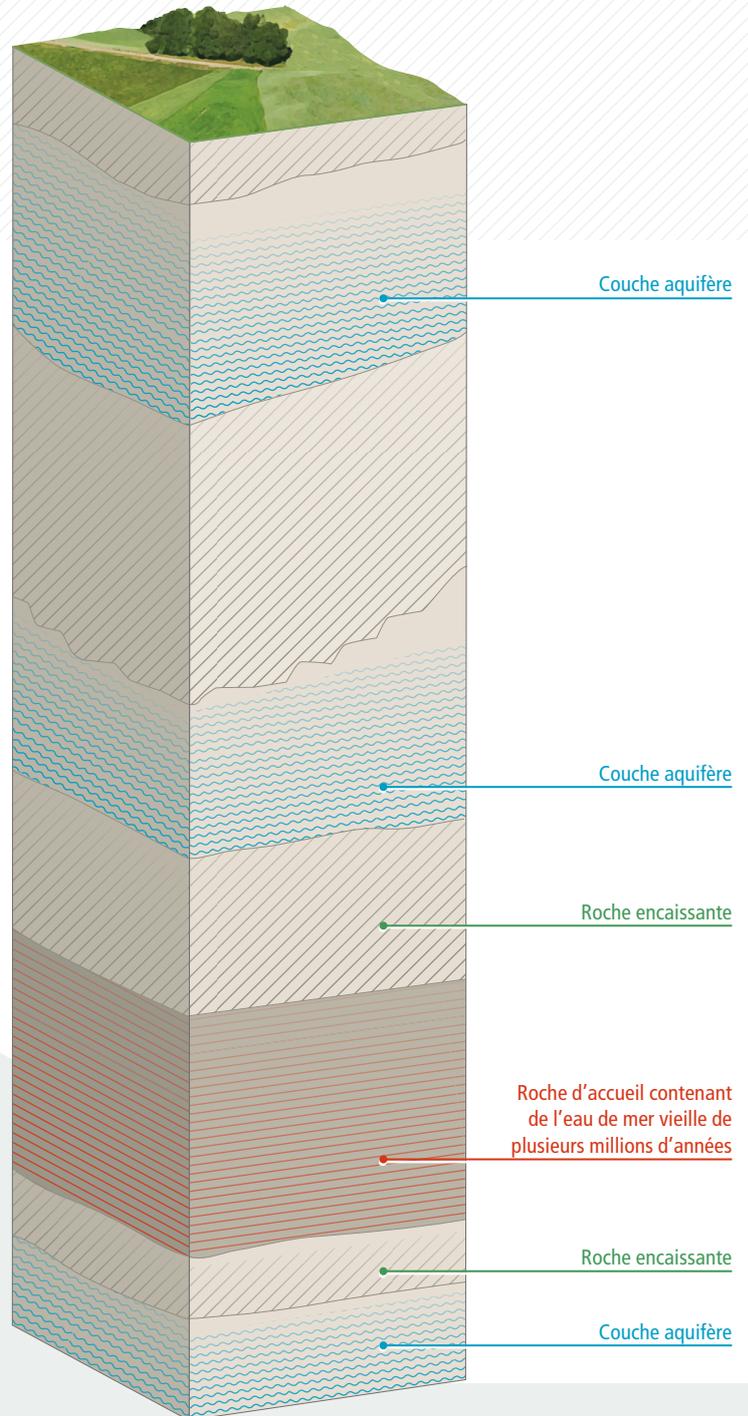


ENSI 33/540: Sicherheitstechnisches Gutachten zum Vorschlag der in Etappe 3 SGT weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete, 2017.

Richtlinie ENSI-G03: Geologische Tiefenlager, Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, 2020.

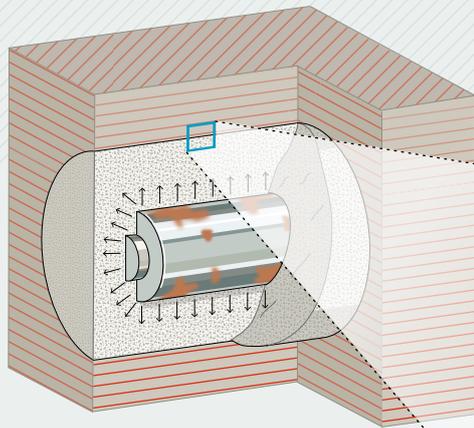
Ce que l'on sait des analyses de l'eau dans les roches argileuses ?

- L'eau interstitielle est vieille de plusieurs millions d'années. Elle possède une composition typique d'eau de mer.
 - ⇒ Ce type d'eau est resté conservé dans l'argile à Opalinus par exemple. Cela montre que l'eau était confinée durant longtemps et qu'elle ne faisait pas partie du circuit d'écoulement dans le sous-sol.
- L'eau située en dessus et en dessous de couches argileuses denses se différencie fortement par rapport à son âge, sa composition chimique et les conditions de pression en présence.
 - ⇒ Cela montre que les couches argileuses situées entre elles sont bien étanches pendant de longues périodes.
- Les substances naturelles dissoutes ne sont pas mélangées de manière homogène dans les couches argileuses denses.
 - ⇒ L'eau interstitielle n'a pas pu s'écouler pendant longtemps.



Niveaux des eaux souterraines

Dans le sous-sol se trouvent des couches géologiques perméables. L'eau peut s'y infiltrer. Ces couches aquifères servent de réservoirs d'eau potable, minérale et thermique. Elles doivent donc être particulièrement protégées lors de la construction d'un dépôt en couches géologiques profondes. De l'eau peut toutefois être aussi trouvée dans des couches imperméables (roches d'accueil et encaissantes). Elle ne peut en revanche pas s'y écouler. L'eau interstitielle confinée est vieille de plusieurs millions d'années.

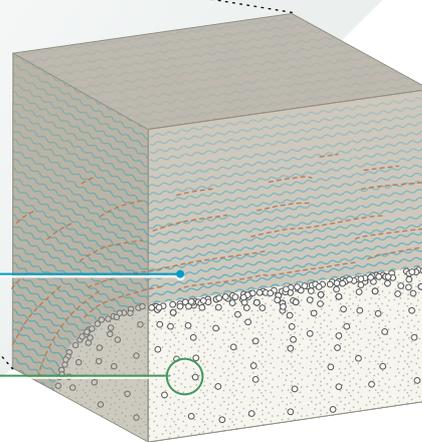


La durée de vie des conteneurs pour dépôt en couches géologiques profondes est limitée

Le matériau des conteneurs pour dépôt en couches géologiques profondes (par exemple de l'acier) se corrode lentement au contact de l'eau interstitielle. Il en résulte de l'hydrogène non radioactif. Les conteneurs pour dépôt en couches géologiques profondes doivent être conçus de telle sorte qu'ils restent étanches pendant 1000 ans en dépit de la corrosion.

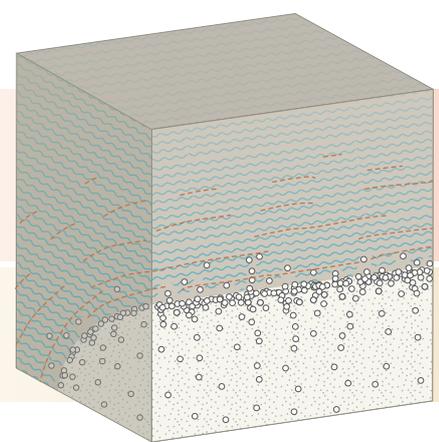
Eau interstitielle

Gaz



La pression du gaz autour des conteneurs augmente

Une fois qu'il a atteint une certaine pression, le gaz issu de la corrosion des conteneurs pour dépôt en couches géologiques profondes traverse l'enveloppe de bentonite. Il s'accumule alors à la limite de la roche d'accueil.



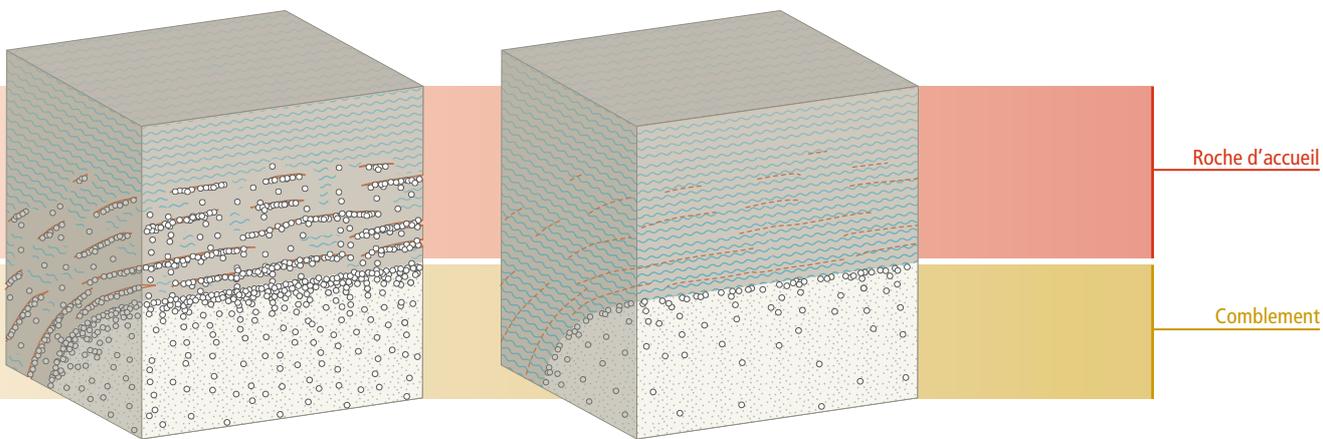
Le gaz se dissout dans l'eau interstitielle

Le gaz accumulé commence à se dissoudre dans l'eau interstitielle de la roche d'accueil. Par la diffusion, le gaz dissout est évacué dans l'eau interstitielle.

La corrosion de métaux et la dégradation de substances organiques produisent des **gaz** issus des déchets stockés. L'hydrogène compte pour environ 95 % du mélange gazeux. Il se forme par la réaction du fer et de l'**eau interstitielle**. Il est à noter qu'il n'est pas radioactif. Par ailleurs, des micro-organismes peuvent dégrader des déchets organiques (tels que des résines de déchets d'exploitation ou du bitume du matériau de remplissage). Par-là, du gaz carbonique et du méthane apparaissent notamment. Étant donné que le gaz carbonique est lié chimiquement par la réaction avec du ciment, le méthane est le deuxième composant du mélange gazeux. Une très petite part des gaz, tels que le tritium, le radon et le carbone 14, est radioactive. Du reste, le radon et le tritium ont une courte période radioactive. Par conséquent, seul le carbone 14 joue un rôle dans les considérations de sécurité.

Les quantités de gaz formées dans un dépôt DHR et DFMR sont semblables. Des différences plus importantes surviennent quant à leur apparition dans le temps. La Nagra part du principe que la formation de gaz aura lieu de manière quasi constante sur 200 000 ans pour les déchets hautement radioactifs. Pour ce qui concerne les déchets faiblement et moyennement radioactifs, le gaz apparaît principalement durant les 10 000 premières années. La pression augmente ensuite dans le dépôt en profondeur. Cette augmentation de la pression est en partie absorbée par le déplacement de l'eau interstitielle ainsi que par le transport de gaz au travers de microfissures existantes ou nouvelles. Le dépôt en couches géologiques profondes doit donc être conçu de sorte que la formation de gaz n'endommage pas les fonctions de barrière de la roche d'accueil, c'est-à-dire ne cause aucune grande fissure dans la roche.

Formation de gaz et activité microbienne



Le gaz déplace l'eau interstitielle et s'échappe le long des microfissures

Si le gaz arrivant ne peut plus être dissout dans l'eau de porosité (car la saturation est atteinte), cette eau est compressée par le gaz. Dans un domaine étroit autour du dépôt en couches géologiques profondes, des microfissures nouvelles et fines peuvent être créées. Les microfissures existantes peuvent s'ouvrir. Le gaz se déplace alors au travers.

Les minéraux argileux gonflent, les microfissures se referment

Lorsque la formation de gaz diminue, la pression du gaz baisse. Les pores se remplissent alors progressivement d'eau. Les minéraux argileux gonflants referment les microfissures apparues.

Il existe plusieurs mesures permettant de maîtriser l'apparition de gaz. Les matériaux à son origine peuvent être soit évités soit réduits. De même, une conception du dépôt optimale permet d'atteindre cet objectif en octroyant plus de place au gaz. Par ailleurs, des matériaux de fermeture appropriés peuvent être employés qui sont perméables à l'air mais retiennent l'eau.



ENSI 33/540: Sicherheitstechnisches Gutachten zum Vorschlag der in Etappe 3 SGT weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete, 2017.

NTB 16-03: Production, consumption and transport of gases in deep geological repositories according to the Swiss disposal concept, Nagra, 2016.

NTB 16-04: Modelling of Gas Generation in Deep Geological Repositories after Closure, Nagra, 2016.

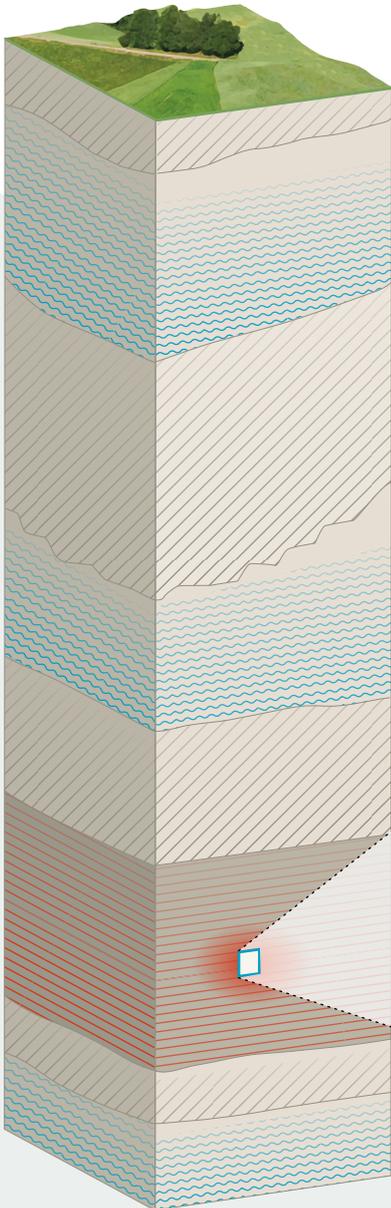
NTB 16-05: An assessment of the possible fate of gas generated in a repository for low- and intermediate-level waste, Nagra, 2016.

Quelle est la pression maximale autorisée dans les galeries d'un dépôt en couches géologiques profondes ? Comment cette pression est-elle régulée ?

La pression maximale autorisée du gaz n'endommageant pas les propriétés de barrière de la roche d'accueil, ne sont pas endommagées, dépend de la profondeur, de la solidité et de la perméabilité de la roche d'accueil. Cette pression maximale dépend donc du site. La formation de pression est limitée dans un dépôt en couches géologiques profondes du moment que la quantité de matériaux à l'origine de gaz est réduite ou minimisée. La conception du dépôt joue aussi un rôle important. Elle permet de limiter la pression du gaz à des endroits choisis. Il s'agit par exemple d'aménager le dépôt de manière correspondante ou d'employer des mélanges de sable et de bentonite perméables aux gaz comme matériau de comblement, tout comme une soupape de surpression. Des expériences et des analyses de sécurité doivent montrer que les fonctions de barrières de la roche d'accueil ne sont pas endommagées.

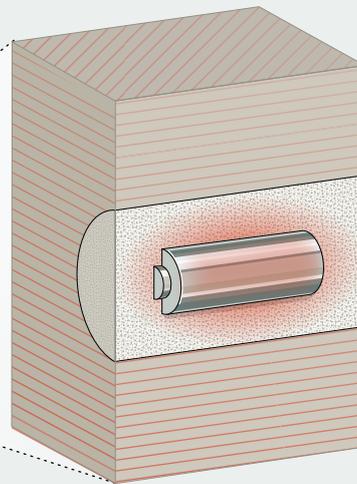
Forum technique sur la sécurité, question 29

Un dépôt en couches géologiques profondes libère de la chaleur



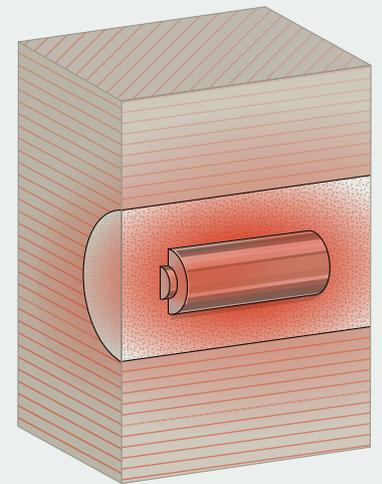
Lors de la désintégration, une diffusion de chaleur se produit en plus du rayonnement radioactif. La production de chaleur est d'autant plus élevée que la quantité de substances radioactives dans les déchets est importante, et que ceux-ci se désintègrent rapidement. La production de chaleur permet de faire la différence entre les déchets hautement, moyennement et faiblement radioactifs. Contrairement aux déchets hautement radioactifs, les déchets faiblement et moyennement radioactifs ne dégagent qu'une faible quantité de chaleur. La production de chaleur diminue avec la désintégration progressive des déchets radioactifs.

Les déchets hautement radioactifs comprennent des éléments combustibles usés, ainsi que des déchets vitrifiés issus du retraitement des éléments combustibles. Même si ces déchets ne sont emmagasinés dans un dépôt en couches géologiques profondes qu'après plusieurs décennies d'entreposage et de refroidissement, le dégagement de chaleur entraîne une augmentation de la température aux alentours



Le déchet radioactif libère de la chaleur

Le déchet radioactif dans les conteneurs pour dépôts en couches géologiques profondes pour déchets hautement radioactifs dégage de la chaleur. De ce fait, la température à la surface de ce conteneur augmente à plus de 100 °C. Le dégagement de chaleur diminue suite à la baisse de l'activité des déchets avec le temps.



La chaleur se répand dans l'environnement

Le conteneur pour dépôt en couches géologiques profondes transmet la chaleur à la bentonite sèche qui l'enveloppe. Celle-ci ne restitue la chaleur que lentement. La conductivité thermique s'améliore avec le temps grâce à la saturation lente de la bentonite au contact de l'eau.

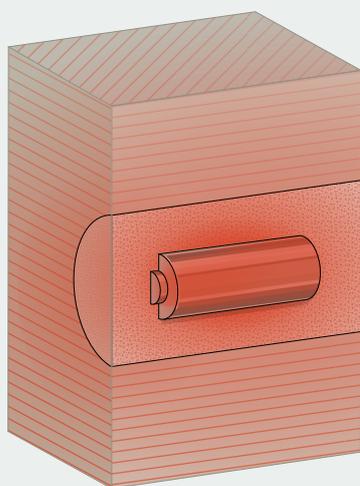
des conteneurs pour dépôt en couches géologiques profondes. La température maximale du conteneur pour dépôt en couches géologiques profondes est atteinte au cours des cent premières années et elle diminue ensuite à nouveau. Étant donné que la chaleur se propage aux alentours des galeries de stockage, des températures élevées y apparaissent pendant quelques milliers d'années après le stockage. Les températures élevées peuvent provoquer une modification du matériau de comblement argileux, la bentonite, ainsi que de la roche d'accueil, l'argile à Opalinus. Cela peut entraîner une capacité de gonflement réduite. La capacité de gonflement est importante pour l'auto-colmatage de l'argile à Opalinus et le confinement étanche du conteneur pour dépôt en profondeur par la bentonite. Les températures élevées engendrent également une augmentation de la pression d'eau interstitielle aux alentours du conteneur pour dépôt en couches géologiques profondes, parce que l'eau interstitielle se dilate en cas de températures élevées. Les températures élevées peuvent aussi accélérer des réactions chimiques, notamment sur le joint de matériau ciment-argile.

Par conséquent, le dépôt en couches géologiques profondes doit être conçu de manière à empêcher que la modification de température et les conséquences éventuelles expliquées n'affectent les propriétés barrières de la roche d'accueil. Il existe plusieurs mesures pour maîtriser les effets du dégagement de chaleur. Les éléments combustibles usés peuvent être entreposés plus longuement pour réduire la chaleur qu'ils dégagent dans le dépôt en couches géologiques profondes. Les conteneurs peuvent aussi être chargés de manière à maintenir la température résultante dans l'argile à Opalinus en dessous de 100 °C. En outre, les distances entre les conteneurs stockés dans les galeries ou celles entre les galeries peuvent être augmentées. Ces mesures permettent de réduire les éventuels effets sur les propriétés du système à barrières multiples.



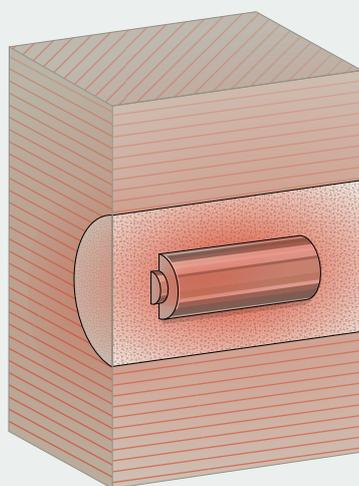
ENSI 33/540: Sicherheitstechnisches Gutachten zum Vorschlag der in Etappe 3 SGT weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete, 2017.

Emch+Berger (2005): Beurteilung der bautechnischen Machbarkeit eines geologischen Tiefenlagers für BE/HAA und LMA und der durch das Lager induzierten Prozesse. Expertenbericht, HSK 35/97, Emch+Berger AG Ingenieure und Planer.



Les températures élevées engendrent une augmentation de la pression d'eau interstitielle

La chaleur se propage toujours aux alentours, ce qui provoque la dilation de l'eau interstitielle et de la roche ainsi que l'augmentation de la pression d'eau interstitielle. La température maximale dans l'argile à Opalinus est atteinte.



La roche refroidit lentement au fil du temps

Une fois la température maximale du conteneur pour dépôt en couches géologiques profondes atteinte dans les cent premières années, la chaleur qu'il dégage dans ses alentours baisse. Les alentours atteignent aussi leur température maximale de manière échelonnée en fonction de leur distance. Avec le refroidissement qui s'ensuit, la pression d'eau interstitielle baisse à nouveau.

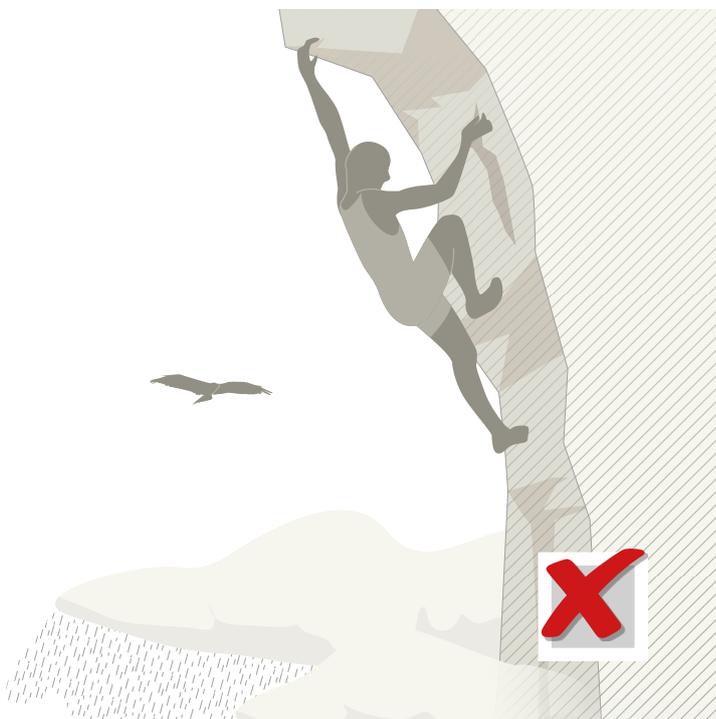
La sécurité prime

Chaque être humain a un besoin variable de sécurité. Chacun évalue également les bénéfices et le risque de ses actions. Certains supportent un risque de cancer plus élevé pour le plaisir d'une cigarette. D'autres acceptent le risque de faire du vélo sans casque. D'autres encore préfèrent agir de manière prudente et éviter les risques. La société détermine dans un processus démocratique ses actions. Bien qu'il ne soit jamais possible de concilier tous les intérêts, le maintien du risque à un niveau tolérable pour la majorité est recherché. La cigarette est ainsi fumée avec des filtres. La fumée passive est quant à elle limitée avec des règlements.

Lors de la recherche de sites et la réalisation d'un dépôt en couches géologiques profondes, la sécurité de l'être humain et de l'environnement a la plus haute priorité. Des réflexions d'ordre sociétal, politique ou financier sont secondaires par rapport aux exigences de sécurité. L'exploitant est responsable de la sécurité d'un dépôt en couches géologiques

profondes. L'IFSN définit dans des directives comment la sécurité requise peut être atteinte. Elle surveille et vérifie que les dispositions légales sont respectées et que la sécurité est garantie. Les critères de sécurité technique contenus dans le plan sectoriel « Dépôts en couches géologiques profondes » permettent d'évaluer les propositions de sites. Pour l'étape 3 de la recherche de sites, l'IFSN a présenté de manière anticipée comment les sites doivent être comparés entre eux du point de vue de la sécurité technique.

Les exigences de base pour un dépôt en couches géologiques profondes sont fournies par la loi et l'ordonnance sur l'énergie nucléaire. En vertu de ces dispositions, des barrières naturelles et techniques échelonnées les unes derrière les autres pour le dépôt en couches géologiques profondes sont employées en vue de réaliser de manière passive la protection nécessaire. Les futures générations ne doivent en effet plus s'occuper de dépôt en couches géologiques profondes.

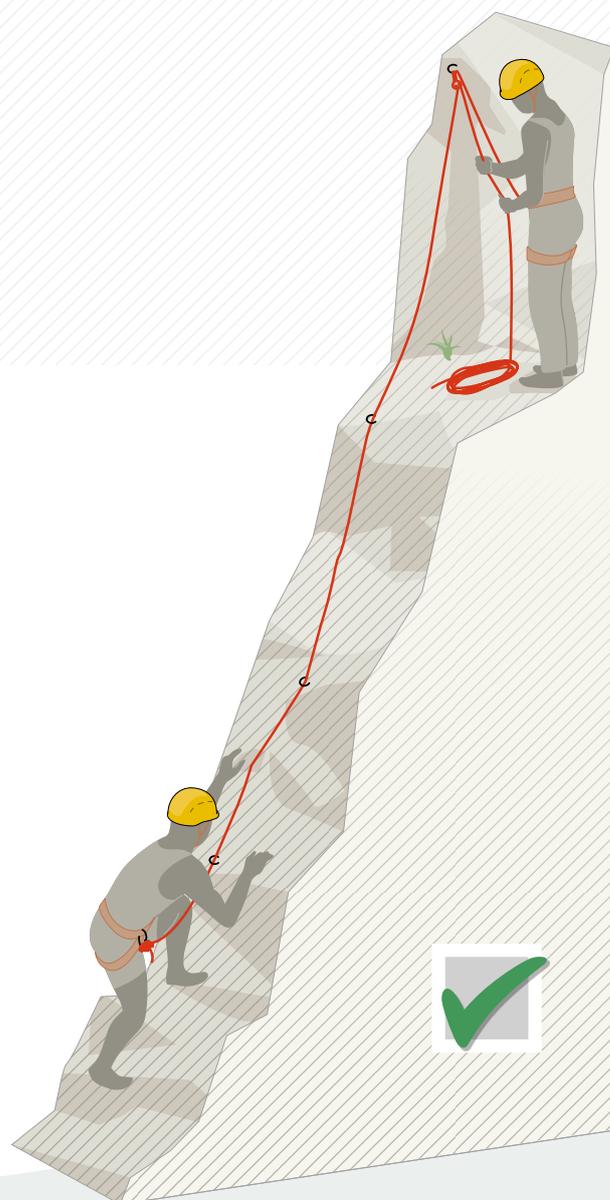


La loi sur l'énergie nucléaire prévoit la nécessité de protéger le dépôt contre des effets néfastes, car c'est de cette manière que l'être humain et l'environnement sont protégés contre les conséquences nuisibles d'un dépôt. La sécurité est un processus dans lequel de nouvelles connaissances issues de la science et de la technique sont prises continuellement en compte. Le long chemin vers la réalisation d'un dépôt en couches géologiques profondes est constitué de plusieurs étapes intermédiaires. Il contribue à la mise en œuvre de la sécurité par un contrôle répété de la sécurité pour les autorisations générales, de construire et d'exploiter.

 **ENSI 33/649:** Präzisierung der sicherheitstechnischen Vorgaben für Etappe 3 des Sachplans geologische Tiefenlager, 2018.

ENSI 33/540: Sicherheitstechnisches Gutachten zum Vorschlag der in Etappe 3 SGT weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete, 2017.

BFE (2011): Sachplan geologische Tiefenlager – Konzeptteil, BFE, (Revision vom 30. November 2011).



Comment la sécurité de l'infrastructure de surface est-elle contrôlée ?

L'identification des domaines d'implantation pour le stockage en couches géologiques profondes s'est déroulée dans les étapes 1 et 2 uniquement selon des critères géologiques et de sécurité technique pour le sous-sol, tout en mettant l'accent sur la stabilité à long terme du sous-sol géologique.

La sécurité des infrastructures de surface sera examinée par l'IFSN à l'étape 3, lors de l'établissement de l'expertise concernant les demandes d'autorisation générale déposées, quand la Nagra soumettra des projets concrets pour les infrastructures de surface.

Forum technique sur la sécurité, question 9

ENSI 33/879

IFSN, CH-5200 Brugg, Industriestrasse 19, téléphone +41 56 460 84 00, info@ensi.ch, www.ifs.ch