

gaz

**formation, dégradation
et transport dans les
dépôts en couches
géologiques profondes**

nagra ● au nom de la responsabilité

Des gaz se forment dans un dépôt pour déchets radioactifs scellé

Le gaz a été pris en compte dans la démonstration de la surêté

L'IFSN exige de la Nagra de démontrer que la surêté à long terme du dépôt en profondeur est garantie et que le critère de protection suivant est rempli: la dose de rayonnement additionnelle à laquelle la population est exposée en raison du dépôt ne doit pas dépasser 0,1 millisieverts par année. Cette dose correspond à environ un cinquantième de l'exposition moyenne par année d'une personne habitant en Suisse. Les influences possibles des gaz sur les barrières de surêté d'un dépôt profond doivent donc être dûment étudiées. Il convient également d'évaluer les mesures permettant de réduire la formation de gaz et de leurs potentiels effets indésirables.

Différents processus chimiques ont lieu dans un dépôt de déchets radioactifs, dont certains dégagent des gaz. Il y a le dioxyde de carbone et le méthane, qui résultent de la dégradation de déchets organiques, mais surtout de l'hydrogène, émis lors de la corrosion de métaux en l'absence d'oxygène. Les gaz peuvent se répandre au niveau du dépôt, le long des cavernes, des galeries et des tunnels comblés. Ils se diffusent également dans la roche argileuse proche, l'Argile à Opalinus (voir glossaire). Il y a cependant d'autres processus chimiques et microbiens qui se déroulent dans le dépôt, lesquels peuvent consommer du gaz et empêcher ainsi une accumulation et donc une montée en pression (voir explications p. 6). Les mouvements des gaz sont étroitement liés à ceux de l'eau qui se trouve dans les pores de l'Argile à Opalinus, car le gaz peut refouler l'eau. À noter que la formation, la dégradation et le transport des gaz sont des processus très lents.

Garantir l'intégrité des barrières techniques et naturelles

La capacité d'un dépôt profond à retenir les radionucléides est tributaire de l'intégrité des barrières de surêté techniques et géologiques (voir glossaire), qui peut cependant potentiellement être compromise par la

formation et l'accumulation de gaz. La roche d'accueil, l'Argile à Opalinus, constitue une barrière de surêté naturelle particulièrement importante pour la surêté à long terme du dépôt en couches géologiques profondes. Cette roche comprend de nombreux minuscules pores remplis d'eau et le transport de substances s'y fait très lentement, par diffusion de pore à pore (voir figure à la p. 3). Un système de pores intact est nécessaire pour un confinement à long terme des radionucléides. Dans l'Argile à Opalinus, les éventuelles fissures se referment d'elles-mêmes, par le gonflement de l'argile.

Les effets du gaz étudiés scientifiquement

La Nagra se penche depuis 1997 sur les conséquences des gaz pour la surêté à long terme d'un dépôt en profondeur de déchets radioactifs. Elle analyse et modélise les processus pouvant survenir lors de la formation, de la dégradation et du transport des gaz dans des expériences menées notamment au laboratoire souterrain du Mont Terri (voir photo ci-dessous).

Nagra



Au laboratoire souterrain du Mont Terri, la Nagra étudie la corrosion de métaux dans des conditions réalistes. Les métaux concernés sont le cuivre et l'acier.

Différents processus dégagent des gaz dans un dépôt profond

Corrosion de métaux

Différents éléments métalliques sont présents dans un dépôt profond: dans les déchets radioactifs, dans les éléments de construction (ancrages en rocher, cintres de soutien) ainsi que le matériau des conteneurs de stockage. La plus grande partie des gaz sont dégagés par la corrosion de métaux. L'acier est le métal le plus répandu dans un dépôt profond, où sa corrosion est très lente et dégage de l'hydrogène. Cette réaction chimique se produit en l'absence d'oxygène et nécessite de l'eau, qui est présente sous forme d'eau interstitielle. L'aluminium, le zinc et les alliages de nickel sont également corrodés en présence d'eau, dégageant aussi de l'hydrogène.

Eau interstitielle dans l'Argile à Opalinus

Dans les roches telles que l'Argile à Opalinus, l'eau ne s'écoule pas librement mais se retrouve uniquement dans les pores de la roche. Après le scellement du dépôt, l'eau présente dans l'Argile à Opalinus environnante diffuse lentement jusqu'aux cavernes de dépôt contenant les déchets. Elle engendre une corrosion des métaux et une dégradation des déchets organiques, deux processus générateurs de gaz. On assiste alors à une augmentation de la pression gazeuse, ce qui déplace à nouveau

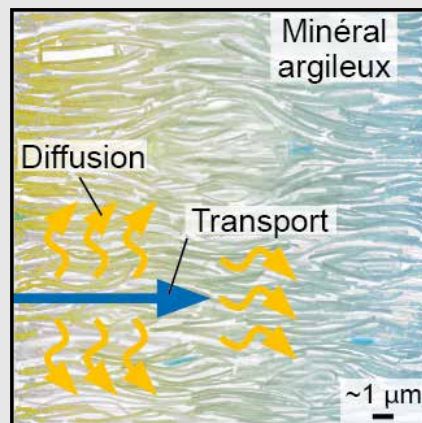
une partie de l'eau du dépôt vers la roche d'accueil ou vers les ouvrages d'accès (voir illustration ci-dessous). Une fois tous les métaux corrodés et toutes les matières organiques décomposées, la pression de gaz diminue; la quantité d'eau dans le dépôt peut alors à nouveau augmenter. La faible vitesse à laquelle l'eau interstitielle et les éventuels radionucléides qui y sont dissouts sont transportés hors du dépôt garantit le respect à tout moment du critère de protection de l'IFSN (voir encadré p. 2).

Décomposition des déchets organiques

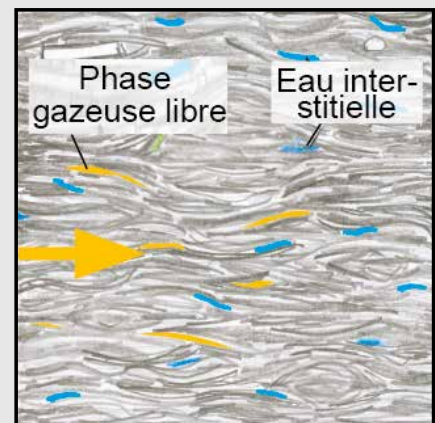
Ce sont surtout les dépôts pour DFMA qui contiennent des déchets organiques en plus des métaux, principalement sous forme de matières synthétiques et de résines échangeuses d'ions (voir glossaire). La décomposition de ces déchets dégage essentiellement des gaz tels que le dioxyde de carbone et le méthane; en quantité, ces derniers représentent toutefois moins d'un dixième des gaz générés dans un dépôt profond. La décomposition en milieu anaérobie se déroule lentement et nécessite des bactéries et de l'eau. Or, les bactéries ne sont actives que s'il y a assez d'eau et de nutriments et que les pores sont suffisamment grands.

Nagra

Description du transport des gaz dans les roches argileuses



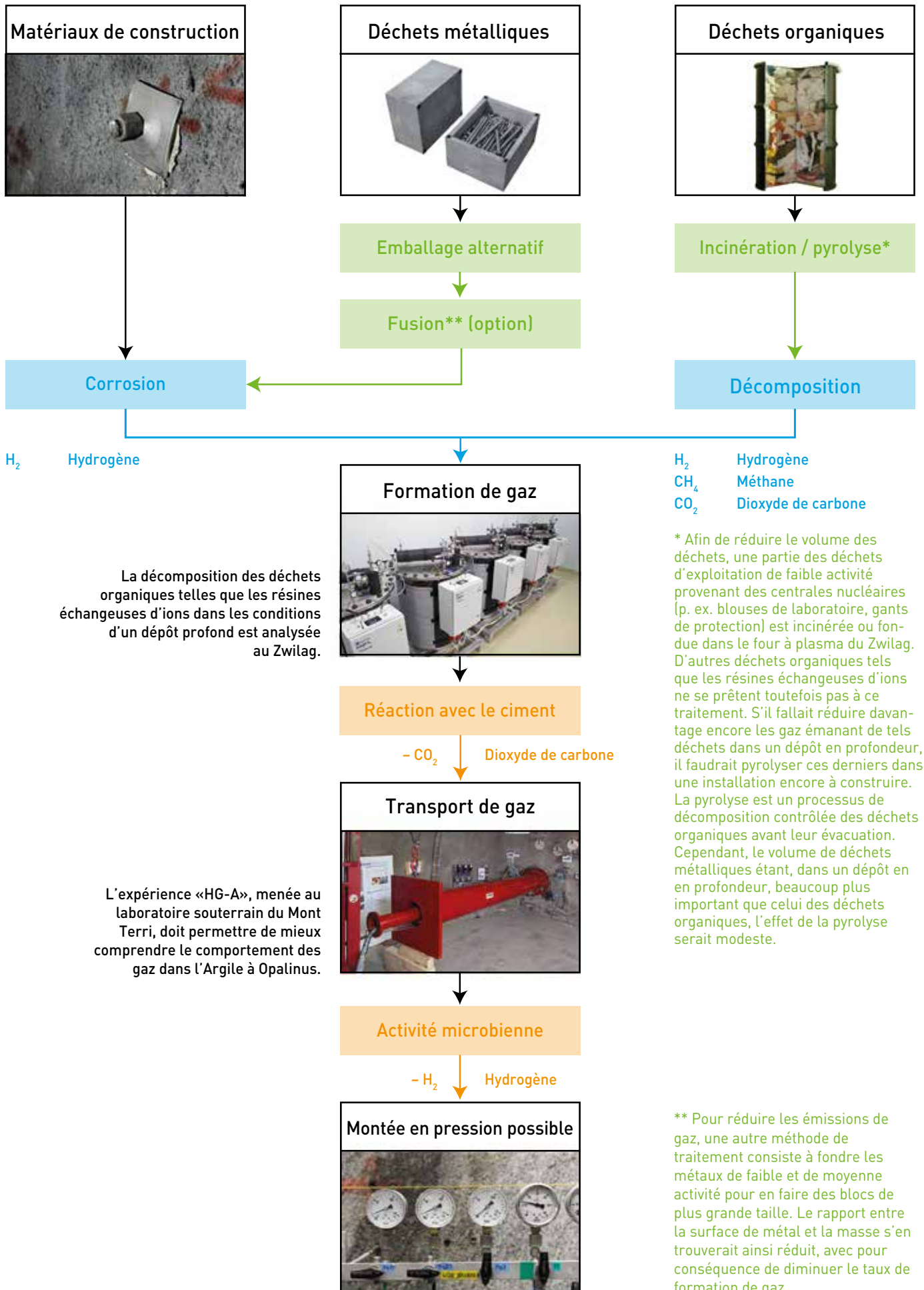
Transport et diffusion du gaz dissout dans la phase liquide
[«flux monophasique»]



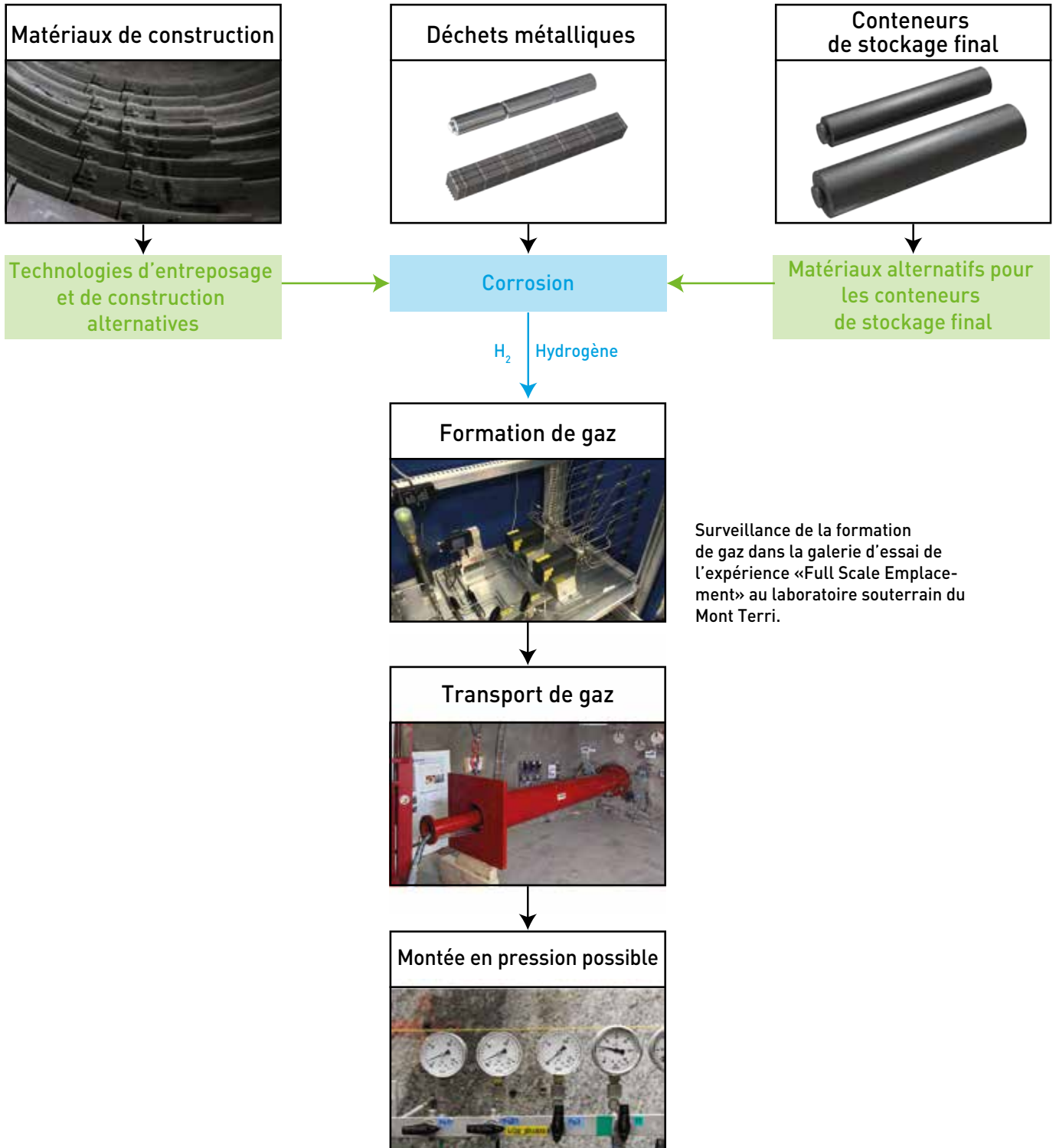
Flux de substances non miscibles dans un milieu poreux
[«flux diphasique»]

Le gaz se dissout dans l'eau interstitielle et diffuse ensuite à travers la roche, d'un pore à l'autre. Si la pression augmente dans la phase gazeuse, il peut arriver que l'eau interstitielle soit refoulée.

Dépôt en profondeur pour déchets de faible et de moyenne activité



Dépôt en profondeur pour déchets de haute activité



Bleu: Processus engendrant la formation de gaz
Orange: Processus consommant du gaz
Vert: Processus et mesures réduisant la quantité de gaz

Différentes mesures pourraient réduire davantage la formation de gaz dans le dépôt en profondeur

Dans les deux types de dépôt, le gaz dominant est l'hydrogène issu de la corrosion de l'acier. Cependant, plusieurs mesures pourraient réduire la formation de ce gaz.

Technologies de dépôt et de construction alternatives

La Nagra a par exemple calculé l'influence des différents éléments d'infrastructure (rails en acier du système de transport utilisé pour l'entreposage, cintres de soutènement des tunnels en acier) sur la production de gaz dans un dépôt pour DHA. Au besoin, des efforts de développement et d'ingénierie pourraient être entrepris pour remplacer ces matériaux.

Matériaux alternatifs pour les conteneurs

Actuellement, il est prévu d'utiliser des conteneurs en acier étanches au gaz, avec des parois d'une épaisseur de 14 centimètres. Dans un dépôt pour DHA, 80 pour cent du gaz provient de la corrosion de ces conteneurs. Une grande partie de ces émissions durant la période considérée (voir l'encadré p.7) pourrait être supprimée en utilisant d'autres matériaux pour les conteneurs. C'est pourquoi la Nagra réalise actuellement des expériences sur des conteneurs en acier avec un revêtement en cuivre, plus résistant à la corrosion (voir la

photo ci-dessous). Les alternatives incluent également des revêtements en nickel ou en titane. Certaines réflexions vont aussi dans le sens d'un transvasement du contenu des fûts en métal pour les déchets DFMA dans des conteneurs d'un autre matériau avant l'entreposage en couches géologiques profondes. Si la quantité de métaux soumis à la corrosion est plus faible, la production de gaz sera réduite d'autant.

Microbes consommateurs de gaz

Au laboratoire souterrain du Mont Terri, on a pu démontrer la présence de bactéries réductrices de sulfates dans l'eau interstitielle de l'Argile à Opalinus. En milieu anaérobie, ces bactéries consomment de l'hydrogène gazeux et du sulfate pour leur métabolisme énergétique. Certaines espèces de bactéries utilisent plutôt du méthane. Des études sont actuellement en cours pour déterminer comment ces deux types de bactéries pourraient contribuer à réduire la pression de gaz.

Réaction avec le ciment

Les cavernes d'un dépôt en profondeur pour DFMA sont comblées avec un mortier à base de ciment. Le ciment fixe le CO_2 chimiquement, ce qui réduit la pression de gaz.

NWMO



Prototype d'un conteneur en acier avec revêtement en cuivre

Les gaz sont maîtrisables et ne posent pas de problèmes de surêté, même dans des conditions défavorables

La **période considérée** – selon les exigences de l'IFSN – désigne l'intervalle de temps qui est pris en considération dans les modèles de calcul utilisés pour les analyses de sûreté d'un dépôt en profondeur. Cette période s'étend sur un million d'années pour le dépôt DHA et à 100 000 ans pour le dépôt DFMA.

La Nagra mène des expériences pour déterminer comment l'Argile à Opalinus et la bentonite utilisée pour combler les galeries réagissent à différentes pressions de gaz. Elle peut également estimer, sur la base d'expériences et de modélisations numériques, les quantités et la pression des gaz escomptées pendant la période considérée (voir encadré à gauche).

Respect des critères de surêté

Les analyses et les calculs montrent que la production de gaz – même dans les estimations les plus pessimistes – ne compromet pas les fonctions sécuritaires de la roche d'accueil et des barrières techniques (voir glossaire) dans les dépôts DFMA et DHA. Dans tous les cas étudiés, la marge de surêté est largement suffisante.

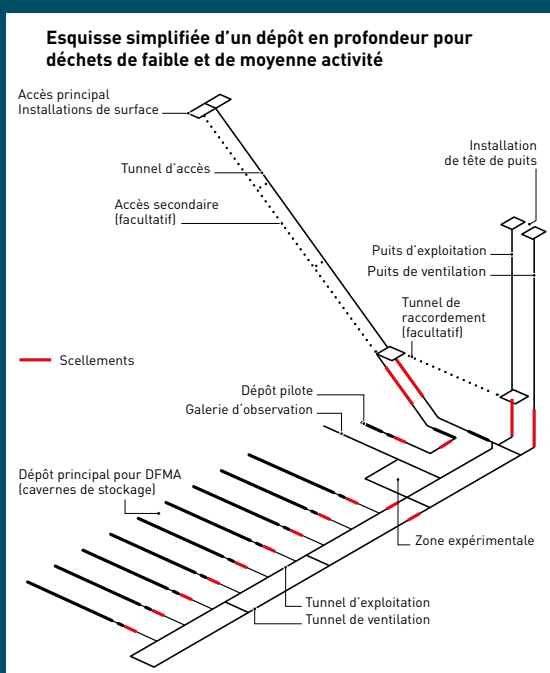
Évacuation des gaz

Les gaz se déplacent le long des parois des galeries, passent par la zone perturbée (voir glossaire) et parviennent dans l'Argile à Opalinus. Au vu des pressions escomptées, les gaz se dissolvent dans l'eau interstitielle et se déplacent par diffusion. Si la quantité de gaz produite serait supérieure à ce qui peut être dissout dans l'eau interstitielle, l'accumulation de gaz aboutit à la formation d'une phase gazeuse et à un

éventuel refoulement de l'eau interstitielle. Avec le temps, le gaz accumulé finit lui aussi par être évacué. Pour éviter une augmentation trop importante de la pression dans les galeries, des mesures supplémentaires, telles que la construction de scellements perméables (voir illustration ci-dessous) peuvent permettre d'évacuer les gaz par les galeries et les ouvrages d'accès. Des recherches intensives sont en cours au niveau international pour perfectionner ces dispositifs. Un essai à l'échelle 1:1 d'un tel scellement est d'ailleurs actuellement en cours au laboratoire souterrain du Grimsel.

Continuer l'optimisation des modèles

La Nagra a exposé en détail dans un rapport de 2016 (voir NTB 16-03) les faits résumés dans la présente brochure. Elle s'emploiera ces prochaines années à réduire davantage les incertitudes restantes, par des activités de recherche ciblées. En outre, elle poursuivra les expériences afin d'affiner encore les modèles déjà très réalistes des différents processus.



Claudio Köppel, Nagra

Dans un dépôt profond, plusieurs scellements ferment les galeries et les cavernes où sont déposés les déchets radioactifs, ainsi que les ouvrages d'accès (p. ex. puits d'exploitation, tunnel d'accès). Les scellements perméables au gaz agissent comme barrières contre l'eau et retiennent les substances radioactives dissoutes. Cette configuration permet aux gaz non seulement de s'échapper des chambres du dépôt vers la roche d'accueil, mais encore d'être acheminés de façon contrôlée vers les ouvrages d'accès et à partir de là vers la roche environnante. Quant aux substances radioactives dissoutes, elles sont retenues également sur leur long chemin à travers l'Argile à Opalinus, où leur désintégration continue. Ainsi, la dose de rayonnement maximale en surface se situe toujours très nettement en dessous de la valeur limite légale (voir aussi encadré p. 2).

Glossaire et explications

Un dépôt en profondeur sera construit en Suisse dans l'Argile à Opalinus, une roche d'accueil peu perméable. Les déchets de haute activité sont entreposés dans des galeries, tandis que les déchets de faible et de moyenne activité le sont dans des cavernes. Les galeries et les cavernes de dépôt sont aussi appelées chambres.

Barrières de surt te d'un dépôt en profondeur

Les barrières de surt te techniques et géologiques assurent un confinement sûr des déchets radioactifs dans le dépôt profond. Les barrières techniques comprennent la matrice des déchets (p. ex. ciment ou verre) et les conteneurs de stockage final, ainsi que le comblement des galeries à l'aide de bentonite et celui des chambres de stockage avec un mortier de ciment. L'Argile   Opalinus joue le rôle de barrière géologique, conjointement avec les autres couches rocheuses; elle garantit une stabilité à long terme et contribue grandement à la rétention des radionucléides.

Zone perturbée

Le creusement de galeries et de cavernes dans l'Argile   Opalinus entraîne une perturbation ou désagrégation de la roche autour desavit s. Cette zone dite perturbée est localement plus perméable à l'eau et aux gaz. Elle se colmate toutefois au bout de quelques années.

Résines échangeuses d'ions

Elles sont utilisées dans les centrales nucléaires pour purifier l'eau des différents circuits. Lorsque ces résines sont usées, elles deviennent des déchets radioactifs qu'il faut conditionner. Elles sont prétraitées dans les centrales, de manière à être aptes à l'entreposage et au stockage final. Un maximum d'eau en est éliminé par égouttage et séchage. Elles sont ensuite liées à l'aide de polystyrène, de ciment ou de bitume.

DHA: Déchets de haute activité provenant de centrales nucléaires, par exemple les éléments combustibles usés

DFMA: Déchets de faible et de moyenne activité provenant des centrales nucléaires

IFSN: Inspection fédérale de la surt te nucléaire



WWW

Pour en savoir plus

- «Production, consumption and transport of gases in deep geological repositories according to the Swiss disposal concept». NTB 16-03, décembre 2016 (en anglais)
- «The Nagra Research, Development and Demonstration (RD&D) Plan for the Disposal of Radioactive Waste in Switzerland». NTB 16-02, décembre 2016 (en anglais)
- «Entsorgungsprogramm 2016 der Entsorgungspflichtigen». NTB 16-01, décembre 2016 (en allemand)
- Themenheft «Entsorgungsprogramm – daran arbeiten wir», décembre 2016 (en allemand)

Vous pouvez télécharger ces documents sur le site www.nagra.ch → Téléchargement/Publications.

Nationale Genossenschaft
für die Lagerung radioaktiver Abf lle
(Société coopérative nationale pour le
stockage des déchets radioactifs)

Hardstrasse 73
Case postale 280
CH-5430 Wettingen

Tél. 056 437 11 11

Fax 056 437 12 07

info@nagra.ch

www.nagra.ch

nagra ● au nom de la responsabilité