

Introduction :

La gestion à long terme des déchets nucléaires de haute activité constitue l'un des défis technologiques et environnementaux majeurs du XXI^e siècle. Cependant, les contraintes techniques, économiques et sociétales associées à ces infrastructures ont stimulé la recherche d'alternatives plus flexibles. C'est ici qu'intervient le stockage en forages profonds verticaux qui s'impose aujourd'hui comme une voie prometteuse pour le confinement durable des déchets radioactifs à haute activité à vie longue. Le principe du stockage vertical consiste à forer un puits dans le socle cristallin stable [3] jusqu'à des profondeurs de 4 à 5 kilomètres [1], puis à y déposer des conteneurs de combustibles usés ou de déchets vitrifiés dans la partie inférieure du trou. La partie supérieure sera, scellée à l'aide de matériaux à très faible perméabilité [4]. Plusieurs pays et organisations internationales explorent sérieusement la voie des puits verticaux profonds pour le stockage des déchets radioactifs, comme dans le programme coordonné de l'International Atomic Energy Agency (IAEA) avec le projet Deep Borehole Disposal Options regroupant 15 pays dont la Chine, le Danemark, l'Égypte, la Finlande, l'Allemagne, l'Indonésie, les pays-bas, la Malaisie, la Norvège, la Russie, la Slovénie, l'Ukraine, et les États-Unis.

Comment est structuré le stockage vertical et quels en sont les avantages ?

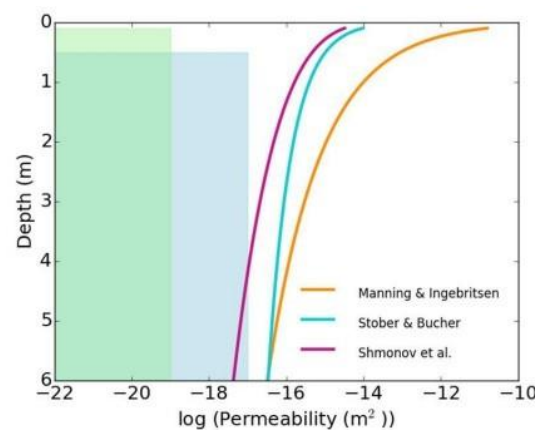
I –Type de sol

Objectif majeur : assurer l'isolement durable des radionucléides Les milieux les plus adaptés sont les formations cristallines stables grâce à [3] :

- Leur faible perméabilité et porosité
- Leur stabilité mécanique
- leur conditions géochimiques réductrices

Choix du milieu géologique est un paramètre clé pour la conception d'un stockage vertical profond il conditionne [3] :

- La faisabilité du forage,
- La durabilité du scellement,
- La sûreté à long terme du dépôt



Graphique 1 : Perméabilité des formations cristallines selon la profondeur (Brady, P.V.,2017, Osten, J. 2024)

- **De plus le socle cristallin est :**
 - Dense, peu fracturé et peu déformable
 - Contient des eaux très anciennes et isolées
 - Limite fortement le transfert de radionucléides

II –Protection des déchets

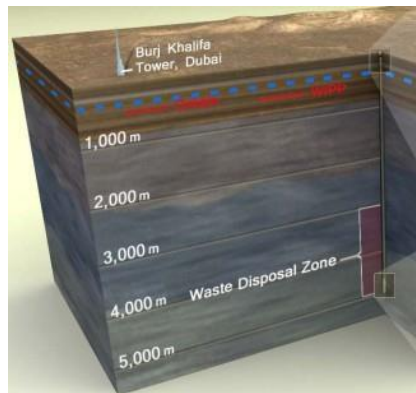


Figure 1 : Localisation des déchets dans le forage (Brady, P.V.,2017)



Figure 2 : Canister type utilisé pour le stockage (Heerens,GJ 2024)

Objectif majeur : Contenir le déchet + prévention totale des fuites de radionucléides [4].

- Colis fabriqués en acier inoxydable duplex : 50 % ferrite 50% austénite

- Hautement résistant à la corrosion
- Adapté aux milieux réducteurs et chloré des eaux profondes

Forme : Tubes fermées par soudure, garantissant l'étanchéité [5].

Présence de raccords filetés permettant :

- L'assemblage en colonne
- Une manipulation sécurisée lors de la mise en place

III –Sécurité du forage

Objectif majeur : stabilité mécanique + prévention totale des fuites de radionucléides.

Le stockage (3–5 km de profondeur) repose sur un puits scellé sur plusieurs kilomètres [1]

Résistance :

100-200 °C

Pression lithostatique des déchets

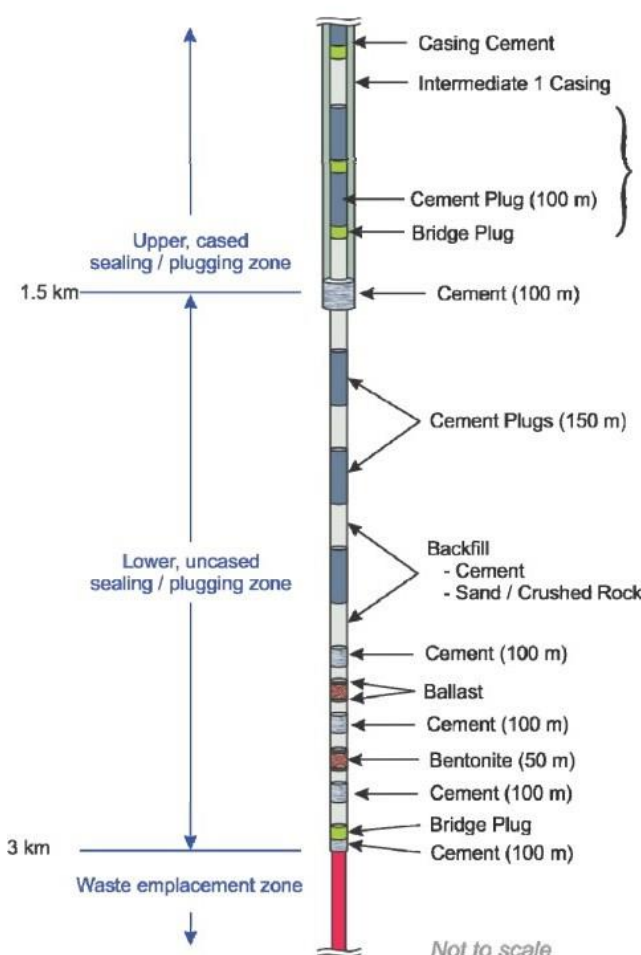


Figure 4 : Structure complète du stockage (Brady.PV 2017 Gibb, F., 2024)

Barrières de scellement en alternance

- Bentonite compactée [2] :
 - Gonfle et colmate les vides et fractures
 - Très faible perméabilité

- Ciment / Béton [2] :
 - Assure la cohésion structurelle
 - Stabilise les parois du forage

- Bridge plugs métalliques [2] :
 - Renforce la résistance mécanique
 - Assure la fermeture interne

- Sable ou roche broyée [2] :
 - Matériaux de remplissage pour stabiliser et répartir les pressions

Stabilisation du puits :

Forage tubé et cimenté sur toute sa longueur [1]

Forage fermé :
-Matériaux hydrophobe
-Roches denses

IV –Avantages et Inconvénient

Tableau 1 : Coût d'installation d'un forage vertical (Brady, P.V.,2017)

	Cost per Borehole
Drilling, Casing, and Borehole Completion	\$27,296,587
Waste Canisters and Loading	\$7,629,600
Waste Canister Emplacement	\$2,775,000
Borehole Sealing	\$2,450,146
Total	\$40,151,333

Les avantages :

- Moins coûteux [2]
- Moins de surface nécessaire
- Moins d'ingénierie lourde
- Plus difficile d'accès une fois fermé donc sécurité excellente
- Plus rapide à construire

Les inconvénients :

- Aucune capacité de récupération [4]
- Pas assez de test et de recherche
- Pas assez de fiabilité à long terme
- Pas adapté à certain déchet producteur de chaleur
- Qualité et inspection en profondeur

Focus sur la limite exothermique :

Certains déchets ne sont pas adaptés thermiquement au stockage vertical profond car leur puissance thermique dépasserait les limites de température supportées par la roche hôte [1]. Dans un puits vertical de faible diamètre, la chaleur se dissipe lentement dans le socle cristallin, ce qui peut conduire à des températures supérieures à 100–200 °C, seuil critique pour la bentonite par exemple le combustible usé récemment déchargé d'un réacteur, certains déchets vitrifiés HA très exothermiques, ou encore des éléments de combustible MOX peu refroidis génèrent une densité thermique incompatible avec les conditions confinées d'un forage vertical [1].

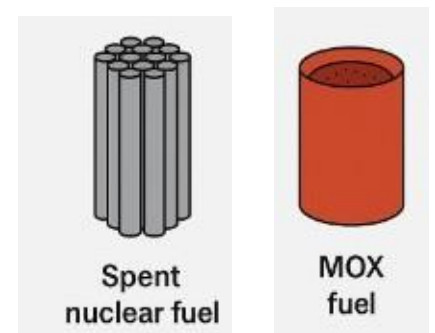


Figure 5 : Différents déchets inapte au stockage vertical (Création personnelle)

Conclusion

Le forage vertical profond constitue une approche innovante pour le confinement à long terme des déchets radioactifs. En s'appuyant sur des formations géologiques stables et faiblement perméables, qu'il s'agisse de socles cristallins, d'argilites ou de roches salines, cette solution exploite les propriétés naturelles du sous-sol profond pour limiter les transferts d'eau et garantir l'isolement des radionucléides avec un système de protection reposant sur la combinaison de barrières successives.

Bien qu'il ne remplace pas les stockages géologiques horizontaux classiques, le forage vertical profond représente une alternative robuste, moins coûteuse et plus accessible, particulièrement adaptée aux pays dont les infrastructures ou les moyens financiers sont limités. Sa mise en œuvre, plus compacte et plus modulable, permet d'atteindre des zones profondes stables tout en minimisant l'empreinte en surface. Ainsi, cette technologie offre une voie crédible et efficace pour garantir un stockage optimal et sûr des déchets radioactifs à haute activité, répondant à la fois aux contraintes techniques, environnementales et économiques. Malheureusement le manque de test, d'expérience et de REX réduit considérablement la fiabilité de ce stockage mais les résultats déjà obtenu permette d'être optimiste pour le futur du stockage vertical.

Bibliographie

- Gibb, F., Beswick, J., Travis, K., 2024. Borehole disposal of spent fuel and other high-level wastes: the case for deep, vertical, fully cased holes in saturated "hard" rock. Front. Nucl. Eng. 3. <https://doi.org/10.3389/fnucn.2024.1470443>
- Brady, P.V., Freeze, G.A., Kuhlman, K.L., Hardin, E.L., Sassani, D.C., MacKinnon, R.J., 2017. Deep borehole disposal of nuclear waste: US perspective. pp. 89–112. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100642-9.00004-9>
- Osten, J., Schaber, T., Gaus, G., Hamdi, P., Amann, F., Achtziger-Zupančič, P., 2024. A multi-method investigation of the permeability structure of brittle fault zones with ductile precursors in crystalline rock. Grundwasser - Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie 29, 49–61. <https://doi.org/10.1007/s00767-023-00561-6>
- Swift, P.N., Arnold, B.W., Brady, P.V. et al. Preliminary Performance Assessment for Deep Borehole Disposal of High-Level Radioactive Waste. MRS Online Proceedings Library 1475, 375–384 (2012). <https://doi.org/10.1557/opl.2012.603>
- Heerens, G.J., Stam, J., Plat, R., van Heesch, E.J.M. (Bert), Willenbroek, T., 2024. Final Ultra Deep Disposal (FUDD): A Novel Wellbore Concept Utilizing Pulsed Power Drilling Technology. 2024 WM Symposia.