

# Aspects scientifiques de la sûreté des déchets radioactifs

Bernard Bonin

- Résumé** Le but d'une installation de gestion des déchets radioactifs est d'assurer la protection de l'Homme. On montre comment cet objectif de sûreté nucléaire est pris en compte dans l'établissement du cahier des charges des installations, en particulier au moyen du concept multibarrières. Des éléments sur ce qu'est une évaluation de sûreté sont donnés, dont le concept de scénarios d'évolution normale ou altérée ; des exemples de recherches nécessaires à ces évaluations, en particulier au moyen de laboratoires souterrains, sont cités.
- Mots-clés** **Sûreté nucléaire, concept d'entreposage, concept de stockage.**
- Abstract** **Science for safety in nuclear waste handling**  
A facility for disposing of nuclear waste has the objective of protecting mankind. It is shown how nuclear safety is taken into account in the definition of the facilities, particularly through the use of the multi-barriers concept. Elements on safety assessment are provided, with emphasis on the scenario (normal or altered) approach; examples of research programs required by these assessment tasks, particularly by means of underground laboratories are given.
- Keywords** **Nuclear safety, storage concept, underground disposal concept.**

Quels que soient les modes de gestion des déchets radioactifs, quels que soient les progrès réalisés dans leur mode de conditionnement, dans la réduction de leur volume et de leur radiotoxicité, il restera toujours des déchets ultimes.

Après une période d'entreposage (temporaire), il est probable que les déchets radioactifs à vie longue iront en stockage profond (définitif). Les deux options entreposage et stockage, complémentaires plutôt qu'antagonistes, présentent pour l'Homme et l'environnement des risques de nature différente. Le texte qui suit essaye de décortiquer la démarche de sûreté élaborée pour les installations d'entreposage et de stockage, et de mettre en évidence le rôle de la science dans cette démarche.

Le but premier de la gestion des déchets est la protection de l'Homme. Cette protection a un sens précis, puisqu'elle peut être transcrite quantitativement en termes de dose\* radioactive. Celle-ci exprime le dommage causé à l'individu par l'exposition à la radioactivité, et fait l'objet d'un règlement, qui limite la dose reçue par le public du fait des activités humaines à un millisievert\* par an (plus précisément, 5 mSv sur 5 ans). A titre de comparaison, la dose moyenne reçue par un individu du fait de la radioactivité naturelle est de 2,4 mSv par an, avec une forte variabilité temporelle et géographique. La nocivité de la radioactivité aux niveaux de dose mentionnés ici n'est pas avérée scientifiquement, ce qui n'empêche pas l'autorité de sûreté de demander aux exploitants nucléaires de respecter non seulement la limite ci-dessus, mais aussi le principe ALARA (« As Low As Reasonably Achievable », le mot « reasonably » laissant la place au bon sens pour tenir compte des contraintes économiques et sociales).

## Entreposer d'abord

Un entreposage de déchets radioactifs ressemble à bien d'autres entrepôts de matières ou d'objets industriels. Les déchets sont conditionnés sous forme de colis destinés à en assurer le confinement et en permettre la manutention. Ces colis (actuellement des blocs de verre de 400 kg pour les déchets HAVL\* issus du retraitement) ou les combustibles usés (CU) eux-mêmes sont les objets qu'il s'agit d'entreposer. Les colis contiennent une grande variété de radionucléides\*, principalement les produits de fission (issus de la fission) et les actinides (issus des captures neutroniques sur les noyaux lourds), tous noyaux instables dont les durées de vie vont de quelques années à plusieurs milliards d'années. Les radionucléides à vie courte relâchent leur radioactivité en peu de temps, et sont donc responsables du caractère irradiant des déchets et de l'échauffement des colis. Les radionucléides à vie longue, quant à eux, sont de moins en moins dangereux à mesure que leur période\* est plus longue, mais leur présence dans les déchets oblige tout de même à prendre des précautions à très long terme.

Une période d'entreposage du CU est de toute façon nécessaire avant retraitement pour laisser le temps aux radionucléides à vie courte de décroître, rendre le combustible moins irradiant et en permettre le retraitement. Une autre période d'entreposage est également nécessaire après le retraitement pour laisser décroître la puissance thermique des colis de verre. L'entreposage de colis de verre ou de CU se pratique déjà sans problème majeur et les ingénieurs ne sont guère dépaysés par la durée de vie envisagée pour l'installation (quelques dizaines d'années).

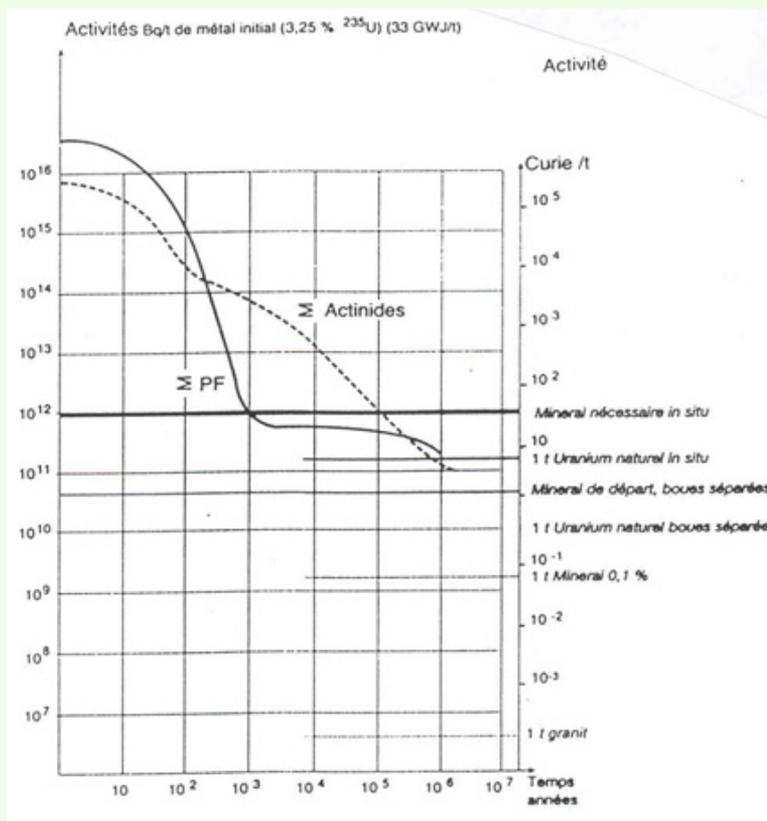
### Les échelles de temps pour l'entreposage et le stockage

Pour les déchets radioactifs, elles sont dictées par le rythme de décroissance des radionucléides qu'ils contiennent.

Au début de la vie du déchet, la radioactivité est principalement due aux produits de fission (PF) ( $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{90}\text{Y}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ). La puissance thermique dégagée par les déchets HAVL\* décroît d'un facteur 2 en 50 ans. C'est cette échelle de temps qui détermine la durée typique d'un entreposage. Les PF à vie courte ayant décrépu après cette période, ce sont les actinides (Pu, Th, Ra, Np, Cm, Am) qui prennent le relais, avec une contribution non négligeable des PF à vie longue ( $^{135}\text{Cs}$ ,  $^{129}\text{I}$ ,  $^{99}\text{Tc}$ ). La radioactivité du déchet retombe au même niveau que celle de l'uranium qui lui a donné naissance au bout d'une centaine de milliers d'années. C'est cette dernière échelle qui dimensionne la durée pendant laquelle un stockage doit remplir son office.

#### Activité des radionucléides contenus dans le combustible utilisé.

On a supposé ici une tonne d'uranium initial, enrichi à 3,25 %, et sortant du réacteur après avoir fourni 33 GWj\*.



En situation normale, et si l'on excepte la très faible dose reçue par les professionnels travaillant dans l'installation, un entreposage n'a aucun impact radiologique sur l'environnement puisqu'il est conçu pour confiner totalement les déchets qu'il contient. C'est bien ce qu'indique le retour d'expérience actuel. Cependant, bien que l'entreposage des déchets nucléaires n'ait pas donné lieu en Occident à des accidents importants, ceci ne signifie pas qu'il ne présente aucun risque pour l'environnement. Les entreposages sont faits pour garantir la reprise ultérieure des colis de déchets, et sont donc facilement accessibles. Leur position en surface ou en subsurface impose une surveillance de manière à éviter intrusions humaines et actes de malveillance. De plus, les installations existantes ne sont pas passivement sûres. Toutes demandent une intervention pour leur maintenance, ce qui les rend fragiles vis-à-vis d'événements comme l'abandon ou le défaut de maintenance. Résultat : les scénarios où tout ne se passe pas normalement dans l'entreposage donnent un impact sur l'Homme et l'environnement. Ces scénarios dits altérés ont jusqu'ici fait l'objet d'études au cas par cas, spécifiques à chaque installation. Ils sont caractérisés à la fois par une faible probabilité d'occurrence et par des conséquences radiologiques plutôt graves. Les conséquences de ces scénarios sont importantes parce que l'entreposage n'a pas de barrière géologique pour « jouer arrière », c'est-à-dire ralentir et diluer l'arrivée des radionucléides dans la biosphère. C'est pourquoi il reste souhaitable de limiter autant que possible la durée de l'entreposage : qui peut garantir que les structures sociales seront stables sur les échelles de temps requises pour un entreposage de très longue durée ?

D'un autre côté, il faut souligner que l'entreposage de très longue durée (quelques centaines d'années) offrirait une grande souplesse de gestion, permettant notamment de prendre le temps des bonnes décisions, d'attendre le développement des systèmes nucléaires de 4<sup>e</sup> génération et enfin de bénéficier pleinement des effets de la décroissance radioactive.

### Entreposage vs stockage

#### L'option de l'entreposage

On entrepose *temporairement* les colis dans des conditions raisonnables de sûreté, avec l'idée de les récupérer plus tard pour les évacuer définitivement.

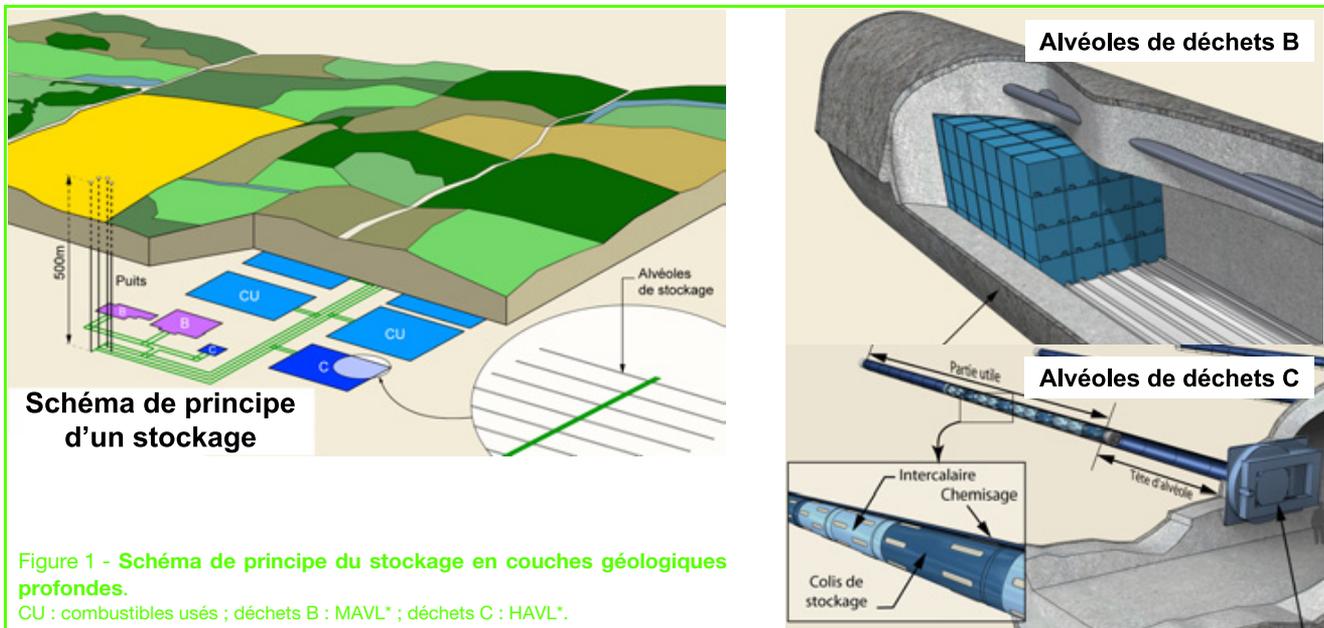
Le *principal argument* des tenants de l'entreposage de longue durée est de laisser aux générations futures la possibilité de gérer les déchets mieux que nous ne savons le faire actuellement.

#### L'option du stockage

Après la phase d'entreposage, il faudra bien stocker, au moins pour certaines catégories de déchets. L'idée est de se débarrasser définitivement des déchets.

Le *principal argument* est de ne pas laisser aux générations futures les déchets dont nous sommes responsables (on notera l'apparente contradiction avec la philosophie de l'entreposage).

Il s'agit donc de deux options philosophiques qui conduisent à des choix techniques différents. On s'en doutait un peu : la science ne gouverne pas seule les grands choix technologiques !



## Stocker ensuite A quoi ressemblerait un stockage - Le concept multibarrière

L'idée du stockage est simple : ce dernier doit confiner les déchets suffisamment longtemps pour que la décroissance radioactive puisse faire son œuvre. Pour assurer ce confinement, on envisage d'interposer une série de barrières entre le déchet et la biosphère : matrice de confinement (verre, béton), surconteneur métallique entourant le colis, puis barrière ouvragée, et enfin barrière géologique (constituée par la roche hôte). Un stockage doit viser les cinq objectifs suivants :

- éloigner le plus possible les déchets de l'Homme,
- retarder la migration des radioéléments,
- assurer un environnement favorable à la durabilité des conteneurs,
- assurer une dilution maximale aux exutoires potentiels,
- protéger des accidents naturels.

Par ses dimensions (kilométriques) et sa profondeur (quelques centaines de mètres), un stockage profond de déchets radioactifs ressemble à une mine (voir figure 1) et pose d'ailleurs des problèmes très similaires pour son creusement, sa ventilation et la manutention des objets en puits ou en galerie.

Cependant, à la différence d'une mine, un stockage se singularise avant tout par la durée de la mission qui lui est assignée, au moins 100 000 ans, ce qui diffère de tous les autres objets faits de main d'homme. Nous ne disposons pas de retour d'expérience sur ce type d'installation ! Autre différence avec l'entreposage : de par son principe, un stockage en évolution normale relâchera de la radioactivité, même si cette quantité est infime et si cet événement est très éloigné dans le temps. Vu les échelles de temps en jeu, ce relâchement ne peut que se calculer... Le recours à la modélisation prédictive est donc obligatoire.

L'évolution probable du stockage est décrite dans le scénario « normal » : au début de leur histoire, disons dans les mille premières années, les colis de haute activité vont échauffer la roche avoisinante, jusqu'à lui faire atteindre une température de l'ordre d'une centaine de degrés. La roche refroidira ensuite lentement, au rythme de la décroissance radioactive des déchets. Dans le même temps, les barrières d'argile\* vont se gorger d'eau : à quelques centaines de mètres de profondeur, les roches sont saturées d'eau car elles sont en général sous la nappe phréatique<sup>(1)</sup>. C'est aussi pendant ce millénaire que les ouvrages souterrains vont se tasser, ouvrant éventuellement des fissures dans la roche située à proximité. Ce tassement, joint à la corrosion des surconteneurs métalliques, rendra difficile – mais pas nécessairement impossible – la récupération des colis.

Beaucoup plus tard (au moins 10 000 ans, et peut-être bien plus), les verres et l'oxyde d'uranium auront commencé à se dissoudre dans l'eau. Cette dissolution par l'eau souterraine entraînera une dispersion des rares radionucléides relâchés, qui entameront alors une lente migration à travers les roches du sous-sol. L'eau souterraine percolera à travers les pores et fissures de la roche hôte, avant de parvenir dans une nappe aquifère<sup>(2)</sup> où sa migration horizontale aboutira finalement à une rivière<sup>(3)</sup> (figure 2).

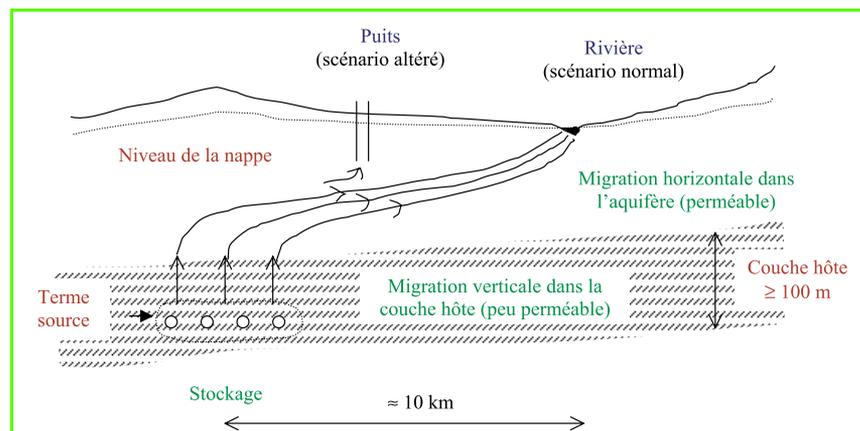


Figure 2 - Le voyage des radionucléides vers l'exutoire.

Une roche hôte très imperméable ralentira beaucoup la migration. Un aquifère « lent » et un exutoire éloigné devraient rallonger encore le temps de trajet. On a pu montrer que dans des formations géologiques peu perméables, il peut s'écouler des millions d'années avant un éventuel retour des eaux vers leur exutoire de surface. Ce sont quelques malheureux radionucléides éteints qui devraient alors refaire surface, leur activité diminuée par la décroissance radioactive. En bon anglais, « delay means decay » ! Au terme de son évolution, un stockage profond aura bien un certain impact radiologique sur l'environnement, puisque la quantité de radionucléides qui rejoindront la biosphère n'est pas nulle. Mais les études menées jusqu'ici suggèrent qu'une barrière ouvragée bien conçue, combinée à une barrière géologique bien choisie, retardera tellement le retour des radionucléides vers la biosphère que les relâchements devraient être minimes, comparés aux flux de radioactivité naturelle.

Un volcan, un séisme majeur, une érosion imprévue ou un changement climatique important pourraient-ils bouleverser ces prédictions plutôt rassurantes ? Les géologues pensent être en mesure de répondre : ces catastrophes n'arrivent pas n'importe quand, ni n'importe où. Aucun volcan nouveau ne naîtra en France pendant les prochains 100 000 ans, à condition d'éviter le Puy-de-Dôme, les Alpes et les Pyrénées. En revanche, des séismes forts sont attendus pendant la vie du stockage. Mais leurs conséquences devraient être assez limitées, entre autres parce que le mouvement sismique est plus faible en profondeur qu'en surface. D'ailleurs, si on prend soin d'éviter les zones sismiques bien connues et de placer le stockage assez loin des failles actives, il est extrêmement probable qu'aucune nouvelle faille ne viendra traverser l'installation pendant sa durée de vie. Certes, les grands séismes bouleversent le relief, mais les plaines ne se transforment pas en montagnes en des temps aussi courts que 100 000 ans<sup>(4)</sup> ! Quant à l'érosion, elle est potentiellement capable de mettre à nu le stockage avant que la décroissance radioactive ait fait son œuvre, mais il semble possible de la prévoir et d'en minimiser les risques en choisissant des sites en plaine. Enfin, des glaciations ne manqueront pas de se produire<sup>(5)</sup>. Certes, la calotte glaciaire ne devrait pas descendre jusqu'à la latitude de la France, mais la glaciation pourrait affecter de façon difficilement prévisible le régime de circulation des eaux souterraines.

Pour prévoir l'impact à long terme du stockage, il faut aussi modéliser la biosphère. Pour cela, on utilise en général des modèles divisant la biosphère en compartiments entre lesquels les polluants transitent selon des lois simples, le plus souvent linéaires, avec des coefficients de transfert déterminés empiriquement. Mais la biosphère réelle évoluera sans doute rapidement au regard des temps géologiques, et cette évolution ne se laisse pas aisément prévoir. Pour cette raison, l'impact dosimétrique calculé *via* cette modélisation doit être pris avec précaution et pour ce qu'il est, c'est-à-dire

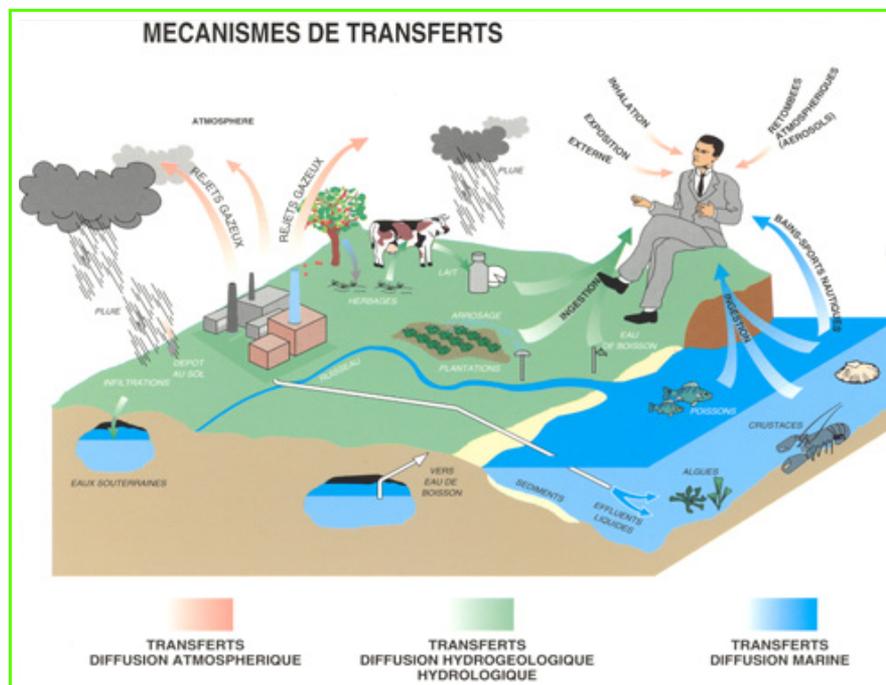


Figure 3 - Les voies de transfert de la radioactivité dans l'environnement. Un modèle à compartiments simplifié © CEA.

un critère conventionnel parmi d'autres, pour juger l'impact d'un stockage.

L'expérience de validation globale de tous ces calculs prédictifs est impossible car les échelles de temps mises en jeu par le stockage sont inaccessibles à l'expérimentation directe. On est donc obligé de recourir à une validation des modèles « par morceaux », destinée surtout à vérifier qu'on a compris les principaux phénomènes en jeu, le fonctionnement des différents éléments du stockage, et à se convaincre qu'on peut faire des prédictions fiables sur le comportement à long terme du système (voir figure 3). D'autres raisons incitent aussi à rester modestes : le milieu naturel est fort complexe, variable et hétérogène, ce sera donc un défi majeur de nourrir les codes avec des données d'entrée pertinentes.

Il existe actuellement une dizaine de laboratoires souterrains dans le monde dédiés à l'étude des stockages profonds (voir tableau I). L'activité qui y est menée vise à valider les prédictions des modélisateurs sur l'impact d'un stockage. L'image qui se dégage de ces études en laboratoire souterrain ou sur des analogues naturels d'un stockage profond se précise au fil du temps. Citons quelques résultats marquants :

- Les formations salines, argileuses et, dans une moindre mesure, granitiques, semblent convenir comme roches hôtes pour un stockage profond.
- Les réactions chimiques entre ces roches, l'eau et les éventuels polluants qu'elle transporte contribuent à ralentir notablement la migration de nombreux radionucléides et sont à peu près comprises.
- Le voyage de l'eau à travers ces formations rocheuses peu perméables est lui aussi compris dans ses grandes lignes.
- L'étude des traceurs naturels permet de reconstituer l'histoire de ce voyage lors des époques géologiques passées et de montrer que les migrations dans une roche hôte bien choisie peuvent être très lentes (voir figure 4).

Tableau I - Les laboratoires souterrains dédiés à l'étude des stockages profonds dans le monde.  
 (\*) : opérationnel depuis 1999.

Pays	Site	Roche	Organisme
États-Unis	Yucca Mountain (Nevada)	Tuf	DOE
	WIPP* (Nouveau Mexique)	Sel	DOE
Canada	URL (Manitoba)	Granite	AECL
Japon	Kamaishi	Granite	JNC
	Tono	Granite	JNC
Allemagne	Asse	Sel	GSF
	Gorleben	Sel	DBE
	Konrad	Argile calcaire	BFS
Belgique	Mol	Argile	SCK/CEN et ONDRAF/NIRAS
Finlande	Olkiluoto	Tonalite	POSIVA
France	Bure	Argile	ANDRA
	Tournemire	Argile	IRSN
Grande-Bretagne	Sellafield	Volcanique	NIREX
Suède	Stripa	Granite	SKB
	Äspö	Granite	SKB
Suisse	Grimsel	Granite	CEDRA
	Mont Terri	Argile	NAGRA

Ces études en laboratoire souterrain ont aussi soulevé quelques questions, dont certaines restent encore ouvertes : pour ne citer qu'un exemple, l'influence d'éventuelles fractures du milieu argileux sur l'efficacité de la barrière géologique n'est pas encore connue avec précision.

Ces questions ouvertes ne semblent pas de nature à remettre en question la confiance des spécialistes dans la

robustesse d'un stockage profond, mais elles justifient la poursuite de recherches en laboratoire souterrain ou sur des analogues naturels des stockages comme le gisement d'Oklo.

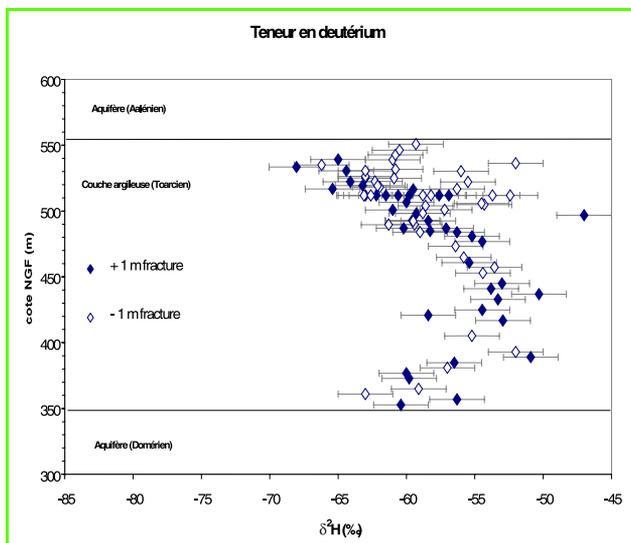


Figure 4 - Étude d'un traceur naturel à la station expérimentale de Tournemire.

L'analyse de la teneur en deutérium des eaux interstitielles du site de Tournemire permet de montrer que la migration des eaux à travers la couche argileuse est très lente, puisque la composition initiale de l'eau est partiellement préservée au cœur de la couche malgré l'âge très reculé de sa formation (180 millions d'années). Le profil de concentration en deutérium a été mesuré ici le long d'un forage vertical. Le profil est régulier pour les points situés loin des fractures (points colorés) et plus irrégulier à proximité des fractures (points blancs), ce qui suggère que les fractures ont joué un rôle dans la circulation du traceur. Ce type de recherche aide à mieux appréhender l'efficacité à long terme de la barrière géologique. (Source : Y. Moreau Le Golvan, IRSN).

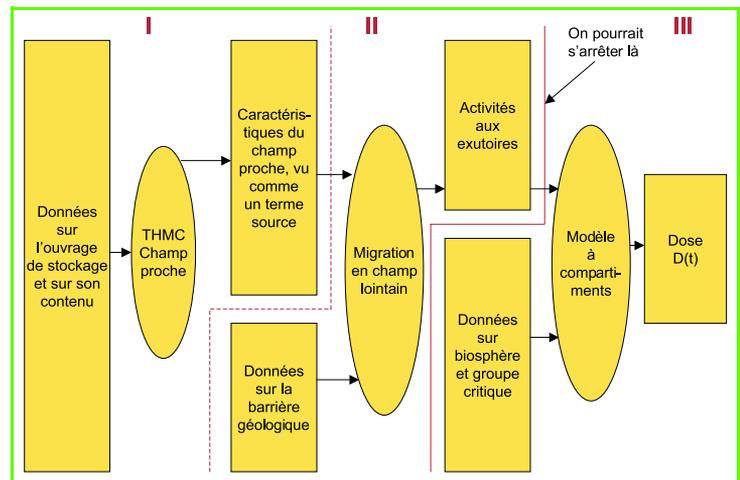


Figure 5 - A quoi pourrait ressembler l'évaluation d'impact d'un stockage profond : panorama général.

Pour prévoir l'impact d'un stockage profond, il faudra agencer les modèles décrivant l'état et l'évolution de ses différents composants. En champ proche (près du stockage), de forts gradients imbriquent et couplent les uns aux autres les phénomènes thermiques, hydrauliques, mécaniques et chimiques (THMC). La modélisation (difficile) de ces phénomènes devrait aboutir à décrire le champ proche comme un terme source de caractéristiques connues (forme géométrique, type de concentration en radionucléides aux frontières du terme source, durée d'activité...) (phase I du schéma). Une fois le terme source défini, une deuxième étape de modélisation pourrait consister à décrire la migration des radionucléides en champ lointain à travers la barrière géologique. Pour cette étape, la grosse difficulté viendra de la connaissance du milieu souterrain, avec ses hétérogénéités. Au terme de cette étape, on devrait pouvoir évaluer le débit d'activité aux exutoires en fonction du temps pour chaque radionucléide. La comparaison avec le débit d'activité naturel devra montrer le faible impact du stockage (phase II). Une dernière étape de modélisation, décrivant le transfert des radionucléides à travers les différents compartiments de la biosphère, doit permettre de calculer un impact dosimétrique (phase III).

L'impact radiologique d'un stockage profond typique a été évalué à l'occasion de plusieurs exercices internationaux, dont les deux plus récents sont EVEREST pour un stockage de déchets B et C, et SPA pour un stockage de CU. Le résultat ? Quel que soit le milieu géologique étudié (sel, granite ou argile), si le stockage évolue selon le scénario « normal » décrit plus haut, l'impact est nul pendant les premiers 10 000 ans et se chiffre ensuite en millièmes de sievert par an pour les populations les plus exposées, soit environ mille fois moins que l'exposition à la radioactivité naturelle (voir figure 6).

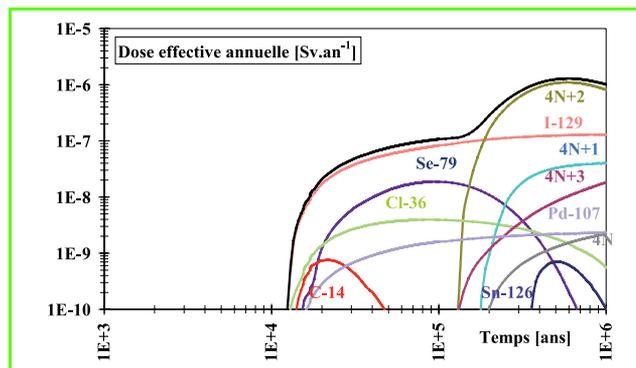


Figure 6 - Impact dosimétrique d'un stockage profond de combustibles usés en milieu granitique (résultats de l'exercice international SPA).

Dans ce cas particulier, l'impact est nul dans les 10 000 premières années après la fermeture du stockage. Après cette date, c'est l'iode 129, très mobile, qui arrive le premier à l'exutoire et qui contribue le plus à la dose. Après plusieurs centaines de milliers d'années, les noyaux lourds ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{230}\text{Th}$ ) issus des chaînes de désintégration 4N (chaîne du  $^{232}\text{Th}$ ), 4N+1 (chaîne du  $^{241}\text{Am}$  et du  $^{237}\text{Np}$ ), 4N+2 (chaîne du  $^{238}\text{U}$ ) et 4N+3 (chaîne du  $^{235}\text{U}$ ) prennent le relais. Il faut remarquer que l'impact maximal de ce scénario « normal » ne concerne qu'une population réduite et ne dépasse jamais le microsievert par an, soit moins du millième de la dose annuelle due à la radioactivité naturelle. (Source : P. Beaudoin, IRSN).

Par contre, on peut imaginer des scénarios « altérés », tel celui d'un puits creusé à proximité du stockage. Ceux-ci donnent un impact plus fort et moins tardif, mais très localisé.

Grâce à l'efficacité et à la redondance des barrières qui le composent, l'impact d'un stockage profond évoluant normalement devrait rester à la fois minime, local et différé. En revanche, les scénarios altérés peuvent avoir des impacts plus lourds. Ils sont par nature imprévisibles, surtout ceux qui sont associés à une intrusion humaine.

## Conclusion

Pour toutes les raisons invoquées plus haut, je crois que la sûreté d'un stockage ne se démontrera pas. Le rôle de la science devra à mon sens être un peu plus modeste : construire la confiance, par un faisceau concordant d'indications montrant que tous les avatars susceptibles d'affecter le stockage ont été prévus jusque dans leurs conséquences... Bref, que ce dernier est d'une conception robuste et maîtrisée.

La maîtrise des risques n'est pas que technique et scientifique car elle a une forte composante sociétale. La démarche de construction de la confiance ne doit pas s'arrêter une fois acquise la conviction des experts. Il faut

### Approches de sûreté : probabilistes ou déterministes ?

L'évaluation de sûreté d'un entreposage ou d'un stockage fait intervenir des phénomènes incertains par nature, comme par exemple un séisme ou une intrusion humaine. Deux grandes approches permettent de traiter ces phénomènes aléatoires :

- L'approche probabiliste consiste à déterminer tous les FEPS (Faits, Événements et Probabilités) susceptibles d'affecter une installation, et à en tirer l'arborescence de ses destins possibles. A chaque branche de l'arbre est associée une probabilité.
- L'approche déterministe consiste à identifier les scénarios les plus pénalisants et à évaluer les conséquences de ces seuls scénarios.

L'approche déterministe, privilégiée en France, est plus simple à mettre en œuvre. L'approche probabiliste est plus satisfaisante intellectuellement, mais peut rapidement déboucher sur des complications inextricables. Dans les deux cas, la difficulté est qu'on n'est jamais sûr d'être exhaustif dans la liste des scénarios ou embranchements possibles. L'avis d'expert est ici irremplaçable.

ensuite passer de l'incertitude scientifique à la négociation du risque. La gestion des déchets nucléaires appelle des décisions politiques prises démocratiquement, c'est-à-dire avec l'avis de citoyens dont la logique intellectuelle est différente de celle des scientifiques. La désaffection croissante des jeunes pour les sciences creuse encore un peu plus le fossé. Scientifiques et citoyens ont beaucoup à se dire !

### Notes

- (1) La seule exception est le site américain de Yucca Mountain. Situé en plein désert, le stockage est placé au-dessus du niveau actuel de la nappe phréatique.
- (2) Les aquifères sont des couches poreuses et perméables du sous-sol, dans lesquelles l'eau souterraine s'infiltré et circule.
- (3) La description du scénario « normal » faite ici correspond plutôt à un stockage dans une formation granitique ou argileuse (c'est sur ces deux milieux que se concentrent actuellement les travaux de recherche français). Le stockage géologique dans des formations salines, pratiqué aux États-Unis (au WIPP) et envisagé en Allemagne, représente un cas à part dans la mesure où on ne peut guère décrire le sel comme un milieu poreux saturé en eau et où les mécanismes de migration des radionucléides sont assez différents de ceux qui sont à l'œuvre dans le granite ou l'argile.
- (4) Les montagnes les plus récentes d'Europe sont les Pyrénées. Elles sont vieilles de 40 millions d'années.
- (5) La prochaine glaciation est prévue dans 10 000 ans environ.

### Pour en savoir plus

- *Les déchets nucléaires, un dossier scientifique*, R. Turley (ed), EDP Sciences, 1997.
- *The scientific and regulatory basis for the geological disposal of radioactive waste*, D. Savage (ed), Wiley, 1995.



#### Bernard Bonin

est directeur scientifique adjoint à la Direction de l'Énergie Nucléaire (DEN) du CEA\*.

\* CEA-DEN, Centre d'étude nucléaire de Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex.  
Tél. : 01 69 08 16 75.

Courriel : [bernard.bonin@cea.fr](mailto:bernard.bonin@cea.fr)