

# LES DÉCHETS NUCLÉAIRES : QUEL IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT ?

*Quel sera finalement l'impact des déchets nucléaires sur l'environnement et l'homme lui-même ? Dans le cas où, après une période d'entreposage qui présente des risques propres, les déchets B et tout ou partie des déchets C seraient confinés dans un stockage géologique profond, les chercheurs peuvent prédire qu'il sera, au pire, minime et localisé. S'ils ne sont pas en mesure de démontrer au sens strict du terme la sûreté d'un stockage aux échelles de temps en cause, ils sont, en revanche, capables de garantir une conception robuste et maîtrisée. Ils apportent un faisceau concordant d'indications montrant qu'ils ont bien envisagé tous les événements qui pourraient affecter les colis stockés dans un milieu donné et séparés de la biosphère par des barrières aux propriétés bien définies.*

Forage sur le site de Tournemire (Aveyron). Le creusement de galeries dans la couche argileuse (photo en médaillon) a mis en évidence des fractures liées au creusement du tunnel, mais aussi des fractures beaucoup plus anciennes, d'origine tectonique. La plupart sont colmatées par des précipitations de calcite, mais certaines débitent de l'eau. Les fractures, hétérogénéités du milieu difficiles à prévoir et à modéliser, seraient susceptibles de compromettre quelque peu l'efficacité de la barrière géologique (Source : J. Cabrera, IRSN).



C. Cieutat/IRSN



88

Après une période d'entreposage, une des solutions proposées est que les déchets B et tout ou partie des déchets C<sup>(1)</sup> aillent en stockage profond. En fait, **entreposage** et **stockage**, options complémentaires plutôt qu'antagonistes, présentent pour l'environnement des risques de nature différente. Le sujet est controversé ; il n'est abordé ici que sous ses aspects scientifique et technique.

## Entreposer d'abord : oui, mais...

Un entreposage de déchets nucléaires ressemble à bien d'autres entrepôts industriels, et les ingénieurs ne sont guère dépaysés par la durée de vie envisagée pour l'installation. Dans le nucléaire, l'entreposage de verres ou de **combustibles** usés se pratique déjà sans problème majeur. En situation normale, exception faite de 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. Que l'entreposage des déchets nucléaires n'ait pas donné lieu en Occident à des accidents importants ne signifie pas pour autant qu'il ne présente aucun risque pour l'environnement. Les installations d'entreposage, conçues pour garantir la reprise ultérieure des **colis** de déchets, sont facilement accessibles. Leur position en surface ou en **subsurface** impose une surveillance propre à éviter intrusions humaines et actes de malveillance. De plus, les installations existantes ne sont pas **passivement** sûres dans la mesure où elles demandent une intervention pour leur maintenance, ce qui les rend fragiles vis-à-vis d'événements comme l'abandon ou le défaut d'entretien. Résultat : les scénarios où tout ne se passe pas normalement dans l'entreposage peuvent se traduire par 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 la gravité potentielle des conséquences radiologiques. Ces conséquences 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 ?

(1) Est ici considéré l'impact sur l'environnement des seuls déchets à vie longue, les déchets B et C, à l'exclusion des autres types de déchets, A, TFA ou résidus miniers, qui posent des problèmes très spécifiques.

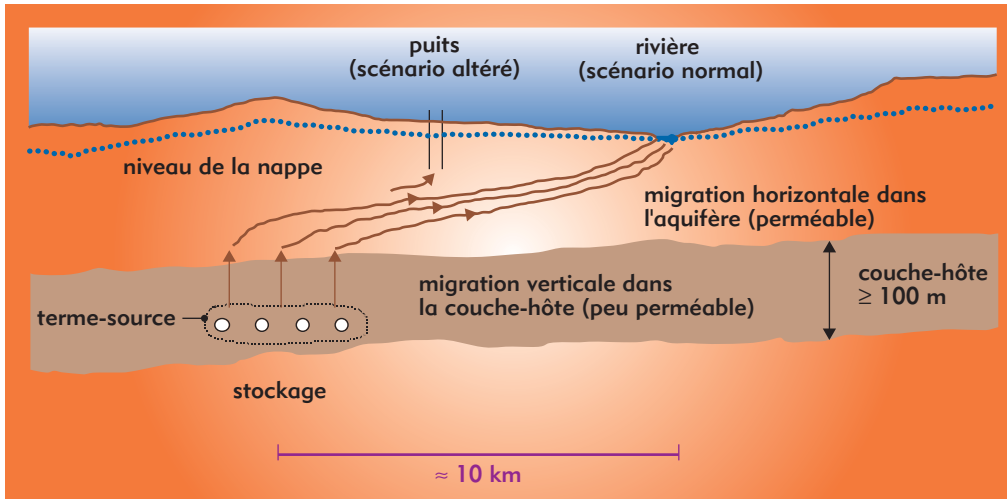


Figure 1. Le voyage des radionucléides vers l'exutoire.



### Reculer pour mieux stocker ?

Après la phase d'entreposage, il faudra bien stocker, au moins pour certaines catégories de déchets. Le rôle du stockage est simple : confiner les déchets suffisamment longtemps pour que la **décroissance radioactive** puisse faire son œuvre. Un stockage se distingue d'abord de tous les autres objets faits de main d'homme par la durée de la mission qui lui est assignée, au moins 100 000 ans : les chercheurs ne disposent pas de retour d'expérience sur ce type d'installation ! Autre différence avec l'entreposage : de par son principe, un stockage en évolution normale finira par relâcher quelque radioactivité, même si cette quantité est infime et si cet événement est très lointain. Vu les échelles de temps en jeu, ce relâchement ne peut que *se calculer*... Le recours à la **modélisation** prédictive est donc obligatoire.

### Les mille premières années

L'évolution probable du stockage est décrite dans le scénario "normal". Au début de leur histoire, 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 gorgier d'eau : à quelques centaines de mètres de profondeur, les roches en sont saturées car elles sont en général sous la nappe phréatique<sup>(2)</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 plus difficile – mais pas impossible – la récupération éventuelle des colis.

### Au-delà des 10 000 ans

Beaucoup plus tard (au moins 10 000 ans et sans doute bien plus), voir *Des verres garantis*

pour des millions d'années) les verres et l'oxyde d'uranium auront commencé à se dissoudre sous l'action de l'eau souterraine, entraînant une dispersion des rares radionucléides relâchés, qui entameront alors une lente migration à travers les roches du sous-sol. L'eau percolera à travers les pores et fissures de la roche-hôte, avant de parvenir dans une nappe aquifère<sup>(3)</sup> où sa migration horizontale aboutira finalement à une rivière<sup>(4)</sup> (figure 1). Une roche-hôte très imperméable ralentira beaucoup cette migration. Un aquifère "lent" et un **exutoire** éloigné devraient allonger encore le temps de trajet. Des chercheurs ont montré que dans des formations géologiques peu perméables, il peut s'écouler des millions d'années avant un éventuel retour des eaux vers leur exutoire.

### Des millions d'années après

Ce sont quelques malheureux radionucléides éteints qui devraient alors faire surface, à l'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

(2) La seule exception est le site américain de Yucca Mountain (cf. encadré H). Situé en plein désert, le stockage est placé au-dessus du niveau actuel de la nappe phréatique.

(3) Les aquifères sont des couches poreuses et perméables du sous-sol, dans lesquelles l'eau souterraine s'infiltré et circule.

(4) La description du scénario "normal" faite ici correspond plutôt à un stockage dans une formation granitique ou argileuse (milieux sur lesquels se concentrent les travaux de recherche français). Le stockage géologique dans des formations salines, pratiqué au WIPP américain et envisagé en Allemagne, représente un cas à part dans la mesure où le sel ne peut guère être décrit comme un milieu poreux saturé en eau, et où les mécanismes de migration des radionucléides sont assez différents de ceux à l'œuvre dans le granite ou l'argile.

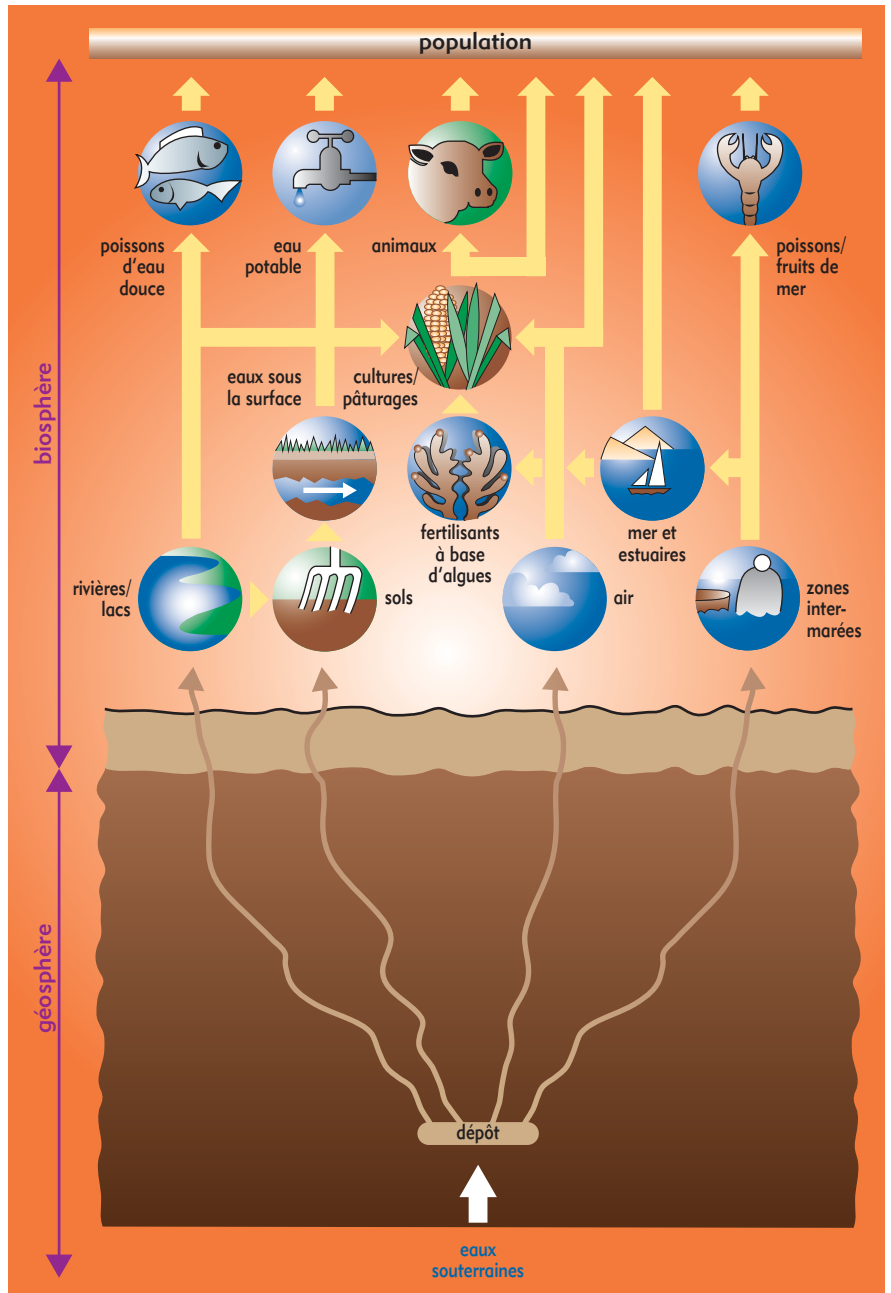
Figure 2. Modèle à compartiments simplifié des voies de transfert dans la biosphère.

quantité de radionucléides qui rejoindront la biosphère n'est pas nulle. Mais les études menées jusqu'ici suggèrent qu'une barrière ouvragée correctement 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.

### Prévoir le pire pour garantir la sûreté à long terme

Un volcan, un séisme majeur, une érosion imprévue ou un changement climatique important pourraient-ils bouleverser ces prédictions rassurantes ? Les géologues pensent être en mesure de répondre : ces catastrophes n'arrivent pas n'importe quand, ni n'importe où. En dehors du Puy-de-Dôme, des Alpes et des Pyrénées, il est certain qu'aucun volcan nouveau ne naîtra en France pendant les prochains 100 000 ans. En revanche, des séismes forts sont attendus pendant la vie du stockage. Mais leurs conséquences devraient être assez limitées, ne serait-ce que parce que le mouvement sismique est plus faible en profondeur qu'en surface. Si l'on a pris 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. Les grands séismes bouleversent certes le relief, mais les plaines ne se transforment pas en montagnes en des temps aussi courts que 100 000 ans<sup>(5)</sup> ! Quant à l'érosion, potentiellement capable de mettre à nu le stockage avant que la décroissance radioactive ait fait son œuvre, 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>(6)</sup>. La calotte glaciaire ne devrait pas descendre jusqu'à la latitude de la France, mais la glaciation pouvant affecter de façon difficilement prévisible le régime de circulation des eaux souterraines, il faudrait en tenir compte.

Pour prévoir l'impact à long terme du stockage, il faut aussi modéliser la biosphère. Pour cela, on utilise généralement des modèles divisant celle-ci 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 un critère conventionnel parmi d'autres dans l'appréciation de l'impact d'un stockage (figure 2).

### Une validation "par morceaux"

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. Les chercheurs sont donc obligés de

recourir à une validation des modèles "par morceaux", destinée surtout à vérifier que les principaux phénomènes en jeu dans le fonctionnement des différents éléments du stockage ont été compris et qu'il est possible de faire des prédictions fiables sur le comportement à long terme du système. D'autres raisons incitent aussi à rester modestes : le milieu naturel étant fort complexe, variable et hétérogène, ce sera un défi majeur de nourrir les logiciels de calcul avec des données d'entrée pertinentes.

Il existe actuellement une dizaine de laboratoires souterrains dans le monde, dédiés à

(5) Les montagnes les plus récentes d'Europe, les Pyrénées, sont vieilles de 40 millions d'années.  
(6) La prochaine glaciation est prévue dans 10 000 ans environ.





Hosatte /CEA

Site des réacteurs nucléaires naturels d'Oklo, au Gabon, dont l'étude contribue à l'évaluation du devenir de radionucléides de très longues périodes dans un environnement présentant des similitudes avec un stockage géologique.



l'étude des stockages profonds (encadré H, *Que font les pays étrangers ?*). Les travaux qui y sont menés visent à valider les prédictions des modélisateurs sur l'impact d'un stockage. Ainsi se précise au fil du temps l'image d'un stockage profond à partir de ces études en laboratoire souterrain ou sur des analogues naturels.

### Des résultats marquants

Des résultats marquants ont été acquis. Il apparaît ainsi que les formations salines, argileuses et 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, comprises pour l'essentiel, s'avèrent contribuer à ralentir notablement la migration de nombreux radionucléides. Le

voyage de l'eau à travers ces formations rocheuses peu perméables est lui aussi compris dans ses grandes lignes. Et l'étude des traceurs naturels, qui permet de reconstituer l'histoire de ce voyage lors des époques géologiques passées, montre que les migrations dans une roche-hôte bien choisie peuvent être très lentes (figure 3).

Certaines questions soulevées par les études en laboratoire souterrain sont encore ouvertes : pour ne citer qu'un exemple, l'influence d'éventuelles fractures du milieu argileux sur l'efficacité de la barrière géologique reste encore à étudier. Ces questions 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 au Gabon.

### Mille fois moins que la radioactivité naturelle

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 combustibles usés. 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 10000 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. Des scénarios altérés sont toutefois imaginables, tel celui du creusement d'un puits à proximité du stockage. Ils donnent un impact plus fort et moins tardif, mais très localisé.

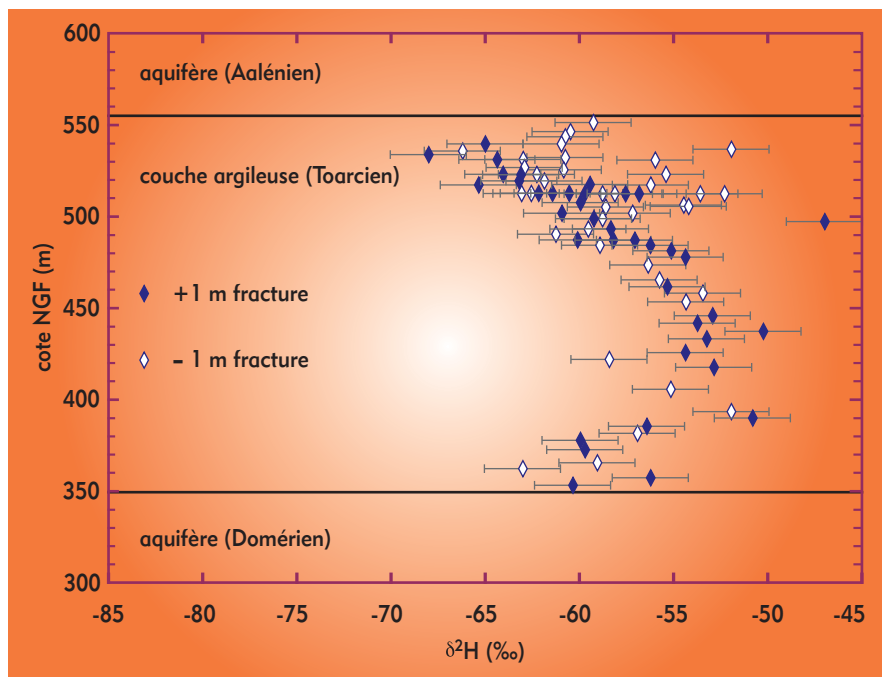
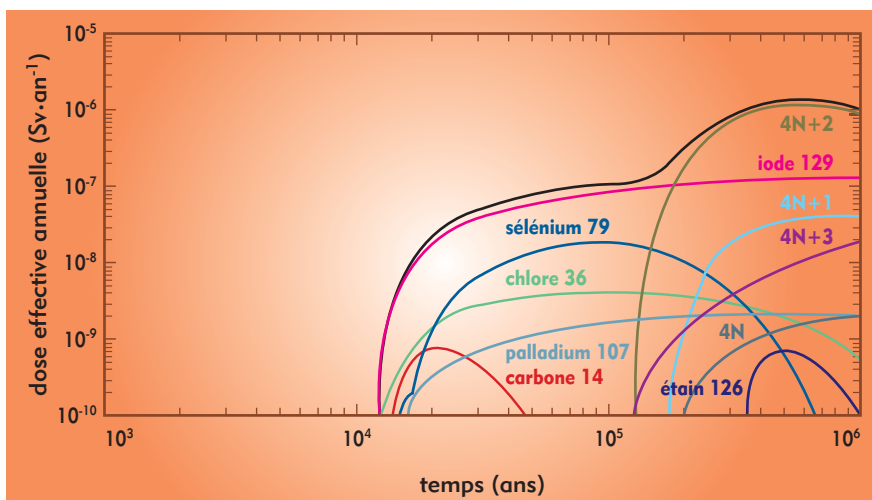


Figure 3. Étude d'un traceur naturel à la station expérimentale de Tournemire (Aveyron). L'analyse de la teneur en deutérium des eaux interstitielles du site, mesurée le long d'un forage vertical, montre que la migration des eaux à travers la couche argileuse est très lente, puisque la composition initiale 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 est régulier loin des fractures (points colorés), et plus irrégulier à leur proximité, ce qui suggère que celles-ci ont joué un rôle dans la circulation du traceur. Ce genre de recherche aide à mieux appréhender l'efficacité à long terme de la barrière géologique (Source : Y. Moreau Le Golvan, IRSN).

**Figure 4. Impact dosimétrique d'un stockage profond de combustibles usés en milieu granitique d'après les 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. C'est ensuite 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 (Ra 226, Th 230) issus des chaînes de désintégration 4N (chaîne du Th 232), 4N+1 (chaîne de l'Am 241 et du Np 237), 4N+2 (chaîne de l'U 238) et 4N+3 (chaîne de l'U 235) prennent le relais. (Source : P. Beaudoin, IRSN).**



Les radionucléides qui contribuent à l'impact radiologique d'un stockage profond sont ceux qui répondent à deux critères : d'une part être présents en quantité importante dans l'inventaire des déchets stockés et présenter une **radiotoxicité** forte et, d'autre part, avoir une **période** suffisamment longue comparée

à la durée de leur voyage vers la biosphère, compte tenu des phénomènes de rétention chimique sur les minéraux du sous-sol.

Le premier critère est chiffrable en termes d'**inventaire radiotoxique**. Sur ce seul critère, les **actinides** arriveraient largement en tête au palmarès des radionucléides préoccupants. Selon le second critère, ce sont les **produits de fission à vie longue** qui prennent la vedette : étant les plus mobiles dans le milieu géologique, ils arriveraient en premier aux exutoires et dans les chaînes alimentaires.

Mais l'impact d'un stockage profond sur l'homme et l'environnement ne peut se juger à l'aune du seul inventaire radiotoxique des déchets ! En effet, 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 minimale, local et différé. Les scénarios altérés, qui peuvent avoir des impacts plus lourds et sont par nature imprévisibles (surtout ceux qui sont associés à une intrusion humaine) sont toutefois susceptibles d'entamer les marges de sécurité prévues.

Pour toutes ces raisons, l'évaluation de la sûreté d'un stockage devra viser un objectif essentiel : construire la confiance par un faisceau concordant d'indications montrant que tous les avatars susceptibles d'affecter le stockage ont bien été envisagés et que ce dernier est d'une conception robuste et maîtrisée. ●

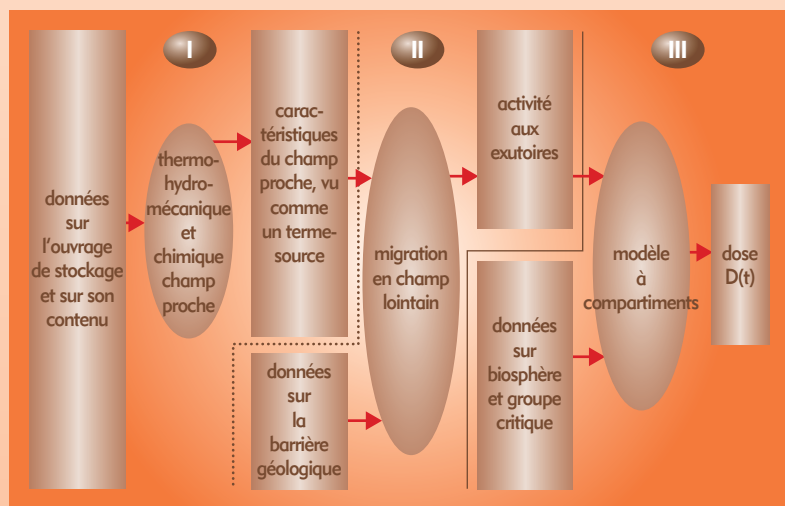
**Bernard Bonin**

Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire en détachement à Cogema Direction de la recherche et du développement Vélizy (Yvelines)

## Comment évaluer l'impact d'un stockage profond ?

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), les phénomènes thermiques, hydrauliques, mécaniques et chimiques sont fortement imbriqués et couplés les uns aux autres. Leur difficile modélisation devrait aboutir à décrire le champ proche comme un terme source de caractéristiques connues (forme géométrique, type de concentration en **radionucléides** aux frontières de ce terme source, durée d'activité...) (phase I du schéma). Une deuxième étape pourrait consister à

décrire la migration des radionucléides en champ lointain à travers la **barrière** géologique : la principale difficulté viendra de la connaissance du milieu souterrain et de ses hétérogénéités. Au terme de cette étape, il devrait être possible d'évaluer pour chaque radionucléide l'activité aux **exutoires** en fonction du temps. La comparaison avec le débit 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).



### Références

“Les déchets nucléaires, un dossier scientifique”, éditeur, R. Turley, Les Éditions de Physique, 1998.  
 “The scientific and regulatory basis for the geological disposal of radioactive waste”, D. Savage, Wiley, 1995.