

## Elimination des déchets nucléaires: que se passe-t-il sous terre?

*Les effets en «champ proche»  
et la sûreté de l'isolation à long terme*

par J. Heinonen et F. Gera

On envisage, on met au point et, dans le cas de certaines catégories de déchets, on exploite déjà de nombreux dépôts de conception différente et variable selon la nature des formations rocheuses d'accueil.

En un mot, le principe qui régit l'élimination des déchets radioactifs est celui de la multiplicité des barrières. Lorsqu'un dépôt est installé dans une forma-

tion rocheuse qui se prête au transport des radionucléides, l'installation devra comporter des éléments qui compensent cette propension et mettent obstacle aux déplacements en question.

Les effets qui s'exercent dans le «champ proche» – ce terme désigne généralement l'excavation même qui sert de dépôt, le déchet emballé, et la formation rocheuse

---

M. Heinonen a fait partie de la Division du cycle du combustible nucléaire à l'Agence et M. Gera appartient au personnel de l'Istituto Sperimentale Modelli et Strutture, S.p.A. (ISMES), Via dei Crociferi 44, I-00187 Rome (Italie).

Les roches basaltiques sont au nombre des formations géologiques envisagées pour l'installation de dépôts de déchets nucléaires. Le basalte est une roche volcanique dense provenant des flots de lave qui ont lentement recouvert la surface de la terre il y a quelque 16 millions d'années. (Photo: Atomic Industrial Forum)

d'accueil (voir l'encadré) – sont assez bien connus dans le cas de certaines formations et lorsqu'on les considère séparément.\* Les effets dont il est question ici sont la corrosion de l'emballage des déchets, la lixiviation, les modifications chimiques et minéralogiques, celles de l'écoulement des eaux souterraines et le transport des radionucléides vers le champ lointain.

Pour savoir dans quelle mesure les systèmes de stockage réussissent à confiner les déchets radioactifs, il faut considérer ces divers effets ensemble. Cet exercice est la partie la plus difficile de l'évaluation et celle où un complément d'étude est nécessaire pour réduire les incertitudes concernant le comportement des divers éléments du champ proche.

Par exemple, les effets des contraintes thermo-mécaniques sur une roche dure peuvent affecter sa perméabilité et le mouvement des eaux souterraines d'une manière difficile à exprimer par un modèle satisfaisant. De plus, la présence du déchet risque de modifier l'environnement chimique et la radiolyse peut donner naissance à des phénomènes d'oxydation. D'autre part, on peut entourer le déchet de barrières artificielles de manière à ce que toute incertitude au sujet de l'association des effets sur le champ proche et du comportement à long terme de ses divers éléments soit compensée par le fort pouvoir isolant de ces barrières.

Des expériences sur place en profondeur sont encore nécessaires, par exemple, pour mieux connaître certains effets sur le champ proche et pour quantifier l'impact de certains paramètres. Tout cela aidera à faire figurer les effets en question dans l'évaluation de l'efficacité de l'ensemble du système de stockage. Les grands projets exécutés dans plusieurs pays devront aider à mieux comprendre les phénomènes en champ proche et favoriseront la diffusion de l'information sur le sujet. La mise au point de systèmes de stockage spécifiques, notamment pour les déchets de haute activité et de longue période, exige des investigations complexes et étendues sur le site choisi.

D'une façon générale l'accroissement des connaissances et le perfectionnement des techniques amélioreront la sûreté du stockage des déchets et les résultats expérimentaux permettront de vérifier les modèles, souvent fondés sur des travaux de laboratoire et des considérations théoriques.

### Corrosion de l'emballage

Aucun déplacement de radionucléides – que l'on attribue à la lixiviation par les eaux souterraines – n'est possible tant que le colis de déchets reste intact. Il comprend le déchet lui-même, le conteneur, le cas échéant d'autres barrières telles qu'un suremballage, un matériau absorbant et des agents chimiques de conditionnement, à condition qu'ils fassent partie intégrante du colis. On peut concevoir des colis de déchets dont la durée serait pratiquement infinie, et on a envisagé des emballages qui dureraient plus de 100 000 ans, mais la plupart des colis

de déchets ne sont pas prévus pour durer de loin aussi longtemps.

Pour le conditionnement des déchets, on peut utiliser des matériaux très divers. Certains sont thermodynamiquement stables dans l'environnement du dépôt.

### Les effets en «champ proche» – définitions

L'étude d'un dépôt de déchets radioactifs de longue période dans une formation géologique implique la connaissance du comportement à long terme des divers composants qui contribuent à isoler le déchet. Les caractéristiques essentielles d'un système d'isolation sont évidemment celles qui déterminent son efficacité générale, notamment du point de vue de la sûreté.

Pour faciliter l'évaluation de cette efficacité, on a réparti les phénomènes en cause entre le champ proche et le champ lointain. Cette distinction est arbitraire, car il n'existe aucune ligne de démarcation physique bien définie entre ces deux champs. Nous examinons ici ce qui se passe dans le champ proche, dans différentes roches-hôtes et dans des dépôts de concentrations différentes. Le champ proche se définit comme «le dépôt creusé, y compris les colis de déchets, les matériaux de remblayage ou d'obturation, et les parties du milieu récepteur dont les caractéristiques ont été ou peuvent être modifiées par le dépôt ou son contenu».

Le nombre et la nature des composants effectivement présents dans le champ proche sont particuliers à chaque système de dépôt et dépendent de la nature de la roche-hôte et des déchets, ainsi que des caractéristiques techniques du dépôt. La plupart des effets en champ proche examinés ici ont trait au stockage de déchets de haute activité vitrifiés et de combustible irradié, mais tient également compte, quand il y a lieu, des effets relatifs à d'autres types de déchets.

### Composants spécifiques

Le champ proche se compose du colis de déchets, du dépôt et de la roche-hôte.

Le **colis de déchets** comprend les déchets, le conteneur et toutes les barrières supplémentaires, à condition qu'elles fassent partie intégrante du colis.

Le **dépôt** est l'installation souterraine dans laquelle les colis de déchets sont placés. Elle comprend toutes les barrières artificielles qui séparent les colis de déchets de la roche-hôte, les matériaux de structure tels que revêtements de tunnels ou de cavités et les matériaux utilisés pour le remblayage et l'obturation.

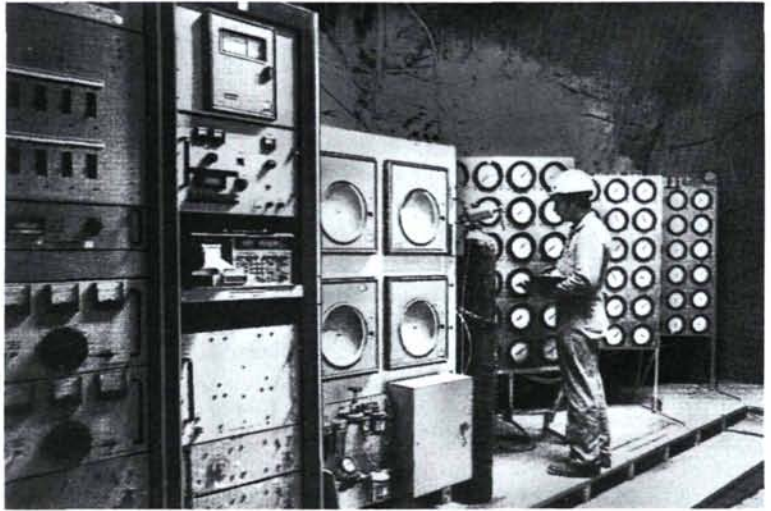
La **roche-hôte** du champ proche est la partie du milieu récepteur dont les propriétés physiques et les conditions chimiques sont sensiblement modifiées du fait du dépôt. L'étendue réelle de cette zone varie selon la nature des déchets, la configuration du dépôt et la roche-hôte; elle est au maximum de quelques dizaines de mètres.

Le champ proche est entouré par la région de la roche-hôte où les modifications provoquées par le dépôt sont minimales et par les autres matériaux géologiques qui peuvent se trouver entre la roche-hôte et la surface du sol. Il n'est pas question ici de l'environnement géologique du champ proche ou du champ lointain. Il y a cependant de fortes interactions entre cet environnement et le champ proche, car les processus qui se produisent dans ce dernier sont à l'origine du transport des radionucléides vers la géosphère. De même, c'est à partir du potentiel de migration dans le champ lointain que l'on détermine le nombre et la nature des barrières à installer dans le champ proche.

Les types de roches actuellement envisagés pour le stockage de déchets radioactifs de longue période sont, entre autres, le sel gemme, les granites et roches cristallines du même genre, les formations argileuses et le basalte.

\* Pour plus de renseignements techniques, voir «Deep Underground Disposal of Radioactive Waste – Near Field Effects», projet de Rapport technique de l'AIEA, juin 1984, et «Effects of Heat from High-level Waste on Performance of Deep Geological Repository Components», projet de Document technique de l'AIEA, octobre 1983.

Une série d'expériences, faites entre 1977 et 1980 à la mine de Stripa, au centre de la Suède, visaient à étudier la possibilité d'installer des dépôts de déchets nucléaires dans des couches profondes de roches cristallines dures. En haut: exécution de mesures aux ultra-sons lors d'une expérience d'échauffement. Ci-dessous: mesure, lors d'une expérience de macro-perméabilité, de la pression de l'eau dans une centaine de sections de quinze trous de sonde. (Photos: SKBF KBS, Stockholm).



D'autres, bien qu'instables, se transforment en un revêtement capable de réduire considérablement toute attaque ultérieure. Enfin on pourrait employer des matériaux en couches épaisses, dont on connaît le rythme de corrosion. Le choix de l'emballage en fonction des paramètres d'un dépôt déterminé dépendra de plusieurs facteurs, dont les prescriptions réglementaires, le pouvoir isolant des autres barrières, et les considérations économiques.

#### Lixiviation par les eaux souterraines

En cas de rupture de l'emballage, le déchet finit par entrer en contact avec l'eau. Les réactions entre la matrice du déchet et l'eau entraîneront une dissolution des radionucléides. La vitesse de la réaction dépendra de la forme du déchet, de sa composition, du rapport entre le volume d'eau et la surface exposée, du débit effectif de l'écoulement sur le déchet, de la température et de certains autres facteurs, telle la radiolyse. La composition de l'eau qui entre en contact avec le déchet est fonction de celle de l'eau interstitielle de la roche-hôte. Elle peut être modifiée par des substances provenant des matériaux tampons ou de remblayage, et aussi de l'emballage. L'écoulement de l'eau sur le déchet est déterminé en grande partie par celui des eaux souterraines dans le champ lointain, dont dépend la quantité

d'eau qui atteint le dépôt. On peut limiter l'écoulement de l'eau sur les colis de déchets en les entourant de matériaux peu perméables. Ces barrières supplémentaires peuvent ramener l'écoulement à des valeurs très faibles et réduire sensiblement la lixiviation de nombreux radionucléides.

#### Effets des rayonnements

Trois effets primaires différents du rayonnement peuvent modifier l'environnement du champ proche: l'altération de la forme du déchet et du matériau tampon éventuel, des fluides présents autour du déchet et de la roche-hôte. Du fait du pouvoir d'arrêt de la matière solide, le rayonnement gamma sera entièrement absorbé à une distance d'environ un mètre des conteneurs de déchets. Les rayonnements bêta et alpha, beaucoup moins pénétrants, seront absorbés dans un très faible volume de matière. En revanche, la radiolyse peut donner naissance à des substances corrosives qui accélèrent l'attaque des récipients et favorisent la lixiviation des déchets. Quant aux autres effets du rayonnement tels que l'emmagasinage d'énergie et les modifications des propriétés physiques des roches et des matériaux artificiels, on a constaté qu'il n'y avait pas lieu d'en tenir compte pour le stockage des déchets.

### Effets thermiques

L'énergie du rayonnement absorbé par la matière se transforme en chaleur. Ce sont le combustible irradié et les déchets de haute activité qui engendrent le plus de chaleur, mais tous les autres types de déchets radioactifs en produisent aussi. Dans un dépôt, la chaleur passera des déchets à la roche-hôte après avoir traversé le récipient et les matériaux tampons, et fera donc monter la température de tous les composants du champ proche, influant ainsi sur leurs propriétés physico-chimiques. La répartition effective de la température dans le dépôt dépend de nombreux facteurs dont :

- le type et l'âge des déchets
- les dimensions et la répartition des conteneurs
- le volume et la nature des matériaux tampons et de remblayage
- la conception du dépôt
- la nature de la roche-hôte.

Dans le dépôt, les températures maximales seront atteintes quelques dizaines d'années après la mise en place des déchets. On a établi et vérifié des programmes d'ordinateur hautement fiables capables de prédire la répartition de la température dans le dépôt à n'importe quel moment.

On continue d'étudier les effets des hautes températures sur les diverses formes de déchets, sur les matériaux tampons et de remblayage et sur les roches-hôtes. Un des effets particulièrement importants pour les dépôts situés dans des roches granitiques ou cristallines du même genre est la modification possible de l'écoulement des eaux souterraines. Si la roche présente des fissures et si elles contiennent de l'eau, ce qui est pratiquement inévitable dans ce genre de roche vu les dimensions d'un dépôt, la chaleur peut réduire la viscosité et la densité de l'eau, augmenter la perméabilité de certaines fissures et provoquer ainsi l'écoulement, voire des phénomènes de convection.

L'étude des effets thermiques a pour but d'établir des critères applicables aux divers composants du dépôt. Ces critères thermiques doivent permettre de prévenir tout effet susceptible d'affaiblir le pouvoir isolant du système de stockage. Pour le moment, il semble que ce soit aux minéraux argileux présents dans la roche-hôte ou dans les matériaux tampons et de remblayage qu'il faille appliquer les limitations de température les plus strictes. Il est jugé prudent de maintenir la température des matières argileuses au-dessous de 100°C. Des températures quelque peu supérieures seraient acceptables dans le sel gemme; le sel étant meilleur conducteur de la chaleur, il s'ensuit que l'on peut imposer une charge thermique sensiblement plus forte à un dépôt situé dans le sel gemme.

### Effets thermo-mécaniques

Un des effets particuliers de l'échauffement de la roche-hôte est la dilatation et les tensions qui en résultent dans le champ proche et le champ lointain. Dans un dépôt souterrain, la roche est déjà soumise à des contraintes géostatiques, voire tectoniques que viennent modifier les excavations. A ce champ de contraintes relativement complexe s'ajoutent celles que provoque la chaleur. On possède beaucoup de renseignements

sur les effets thermo-mécaniques dans le sel. Les calculs et les observations concordent très bien. Dans les roches dures comme le granite, les contraintes sont absorbées par les joints et les fissures dont il est pratiquement impossible d'établir le modèle; il y a donc des écarts entre les données théoriques et expérimentales.

En ce qui concerne les argiles, on possède peu de renseignements sur leur comportement mécanique au niveau des dépôts. On en sait encore moins sur leur comportement thermo-mécanique, car on n'a pas encore fait d'essais en profondeur *in situ*. Il en va de même pour les autres roches-hôtes possibles. On ne s'attend à aucune difficulté particulière résultant des effets thermo-mécaniques; il faut toutefois les connaître pour optimiser la conception du dépôt.

### Modifications chimiques et minéralogiques

L'excavation d'un dépôt et la mise en place de colis de déchets et d'autres matériaux dans la roche-hôte bouleversent l'équilibre naturel entre la roche-hôte et l'eau interstitielle. Les excavations font pénétrer de l'oxygène et modifient les tensions *in situ* et les gradients hydrauliques. Ces perturbations sont de nature à modifier la minéralogie de la roche-hôte et la chimie de l'eau souterraine. Ce potentiel est accru par l'élévation de température due aux déchets. On pense toutefois que ces modifications sont de peu d'importance et n'affectent qu'un faible volume de matière si la conception du dépôt repose sur de bons critères thermiques.

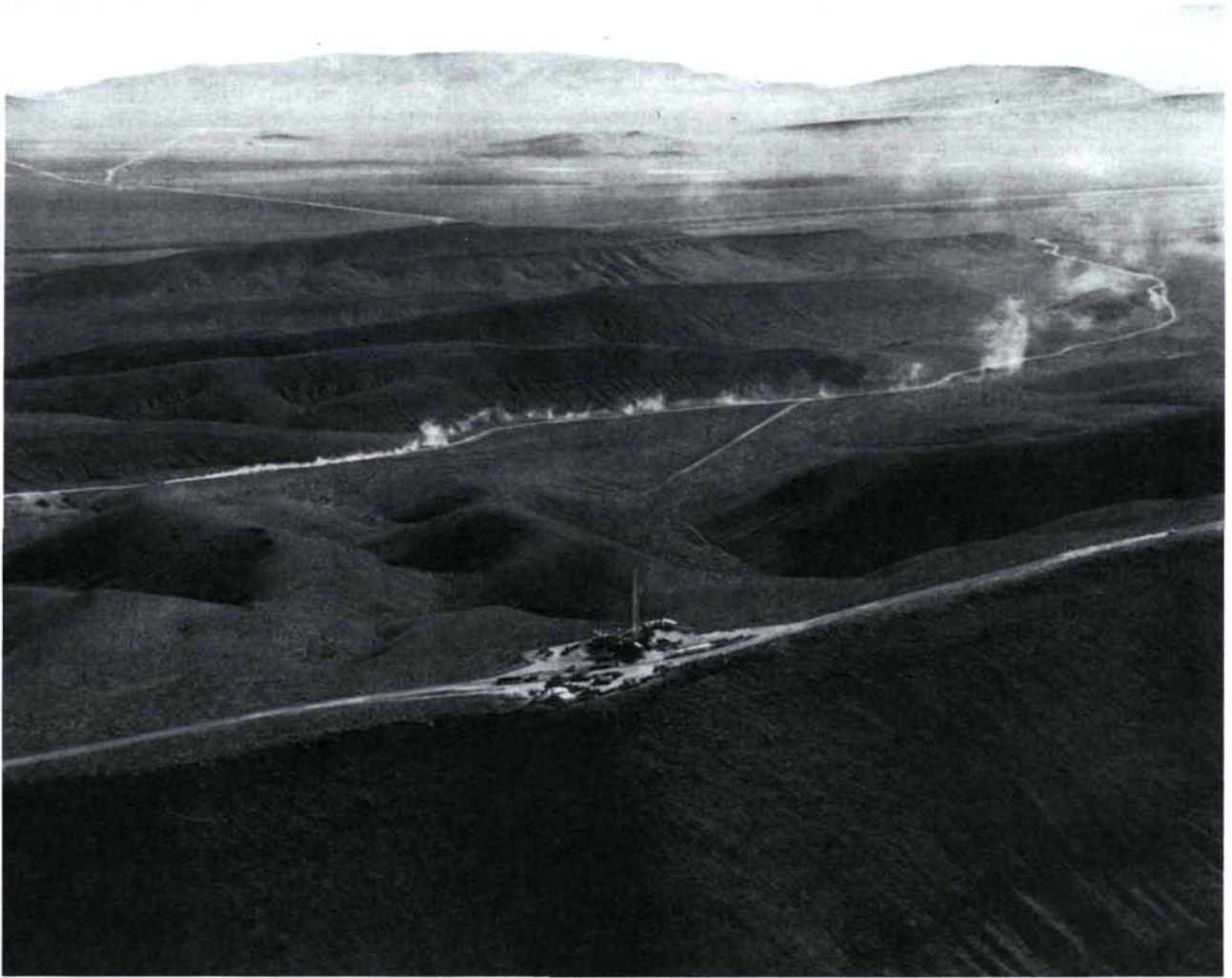
### Écoulement des eaux souterraines

Comme l'eau est le principal vecteur des radionucléides qui pourraient s'échapper d'un colis de déchets, toute modification de l'écoulement des eaux souterraines présente un intérêt particulier. Dans le champ proche, quatre mécanismes essentiels peuvent modifier cet écoulement :

- la mise en place de barrières peu perméables
- l'effet de drainage des excavations souterraines
- les modifications des propriétés physiques de la roche-hôte
- l'échauffement dû aux déchets.

Le potentiel de migration de l'eau dans le champ proche diffère selon les roches. Le sel est d'ordinaire extrêmement imperméable et sans eau en circulation. La seule eau présente dans la zone du dépôt est sous forme de petites inclusions de saumure. La teneur totale en eau du sel est normalement de l'ordre de 1 à 2% dans le sel en bancs et beaucoup moins de 1% dans le sel diapirique. Le principal effet sur le champ proche dans le sel serait la migration des inclusions de saumure vers la source de chaleur. Ce phénomène peut certes avoir des effets importants sur les conditions chimiques aux environs des déchets et sur la corrosion des récipients, mais le volume de saumure est trop faible pour qu'il y ait une migration tant soit peu importante de radionucléides.

La circulation des eaux souterraines dans les roches granitiques et cristallines du même ordre dépend de l'étendue, des caractéristiques et de l'interconnexion des fissures ainsi que du gradient hydraulique régional. Pour



Les formations de tuf du site d'essais du Nevada sont au nombre des zones où l'on étudie, aux Etats-Unis, la possibilité d'installer des dépôts de déchets radioactifs de haute activité. Le tuf est une roche faite de cendres volcaniques durcies et consolidées dont les couches se sont déposées lors d'éruptions volcaniques successives, il y a des millions d'années. (Photo: Atomic Industrial Forum)

se prêter au stockage des déchets, une masse de roche dure doit présenter une très faible conductivité hydraulique; cela signifie qu'il faut qu'il y ait très peu de fissures et qu'elles laissent passer très peu d'eau du fait qu'elles sont fermées par la pression géostatique ou par l'accumulation de matériaux secondaires, ou par les deux à la fois. Le creusement d'un dépôt dans un tel environnement géologique modifie l'écoulement des eaux souterraines avant même la mise en place des déchets. Cela est dû à l'effet de drainage des excavations, qui, étant à la pression atmosphérique, agiront comme un déversoir, ainsi qu'aux modifications de la perméabilité que la variation des contraintes pourrait causer dans les zones de fissures adjacentes aux ouvertures.

Après la mise en place des déchets et le remblayage du dépôt, l'hydrologie du champ proche peut encore être modifiée par les effets thermo-mécaniques décrits plus haut et par la présence des matériaux tampon et de remblayage. Ainsi donc l'établissement d'un modèle hydrogéologique d'un dépôt peut être une tâche complexe. Les incertitudes qui en résultent peuvent être compensées soit par la forte aptitude du champ lointain à réduire la migration des radionucléides, soit par les barrières artificielles placées dans le dépôt.

Les roches argileuses sont d'ordinaire très peu perméables. Dans les argiles plastiques, l'eau ne circule que par les pores, alors que quelques fissures aquifères peuvent se présenter dans les argiles rigides et dans les schistes. On estime que, pour être jugée propre à recevoir un dépôt de déchet, une formation argileuse ne doit pas être coupée par des fissures perméables. Une fois les déchets mis en place et le dépôt remblayé et hermétiquement clos, l'état du champ proche dépendra de la conception du dépôt.

Par exemple, dans un dépôt constitué par une série de trous de sonde exécutés à partir de la surface, chaque trou est isolé des autres et les récipients seront plus ou moins en contact avec l'argile. Dans le cas d'un dépôt en galeries, les conteneurs de déchets peuvent être placés dans des cavités creusées à partir des galeries ou dans les galeries elles-mêmes. Dans l'un ou l'autre de ces deux derniers cas, les galeries seront comblées au moyen d'un matériau possédant des propriétés hydrauliques probablement différentes de celles de l'argile restée intacte.

L'hydrogéologie du champ proche sera donc sensiblement différente de ce qu'elle était dans la situation primitive de la formation. Si toutefois les communications entre le dépôt et la surface sont obturées et

si aucun événement ultérieur ne vient créer de nouvelles voies d'écoulement, les modifications de l'écoulement des eaux souterraines dans le champ proche restent localisées et peu durables, et l'on pense qu'elles ne peuvent avoir que peu d'influence sur le comportement général du dépôt.

Si le dépôt est situé dans le tuf d'une zone non saturée, la mise en place des déchets ne devrait avoir que peu d'effet sur l'écoulement des eaux souterraines. Le champ thermique de la zone du dépôt devrait chasser l'eau et réduire l'écoulement sur les colis de déchets.

Pour un dépôt dans le basalte, les effets sur la circulation des eaux souterraines seraient les mêmes que pour un dépôt dans le granite.

### **Transport des radionucléides vers le champ lointain**

Il ne faut pas considérer séparément les effets sur le champ proche qui viennent d'être décrits; il faut au contraire les combiner entre eux et en tirer une évaluation réaliste des possibilités de transport des radionucléides vers le champ lointain.

S'agissant d'un dépôt dans le granite ou dans des roches cristallines du même ordre, l'émission et le transport des radionucléides dépendra surtout du débit des eaux dans les fissures de la roche. La présence de minéraux ferreux limite le potentiel d'oxydo-réduction de l'eau et peut maintenir à des valeurs très basses la solubilité d'un grand nombre d'actinides. Les radionucléides peuvent aussi se diffuser dans la matrice de la roche et être adsorbés par les surfaces poreuses, ce qui les soustrait à l'eau qui s'écoule par les fissures.

Dans le cas d'un dépôt situé dans le sel, aucun transport de radionucléides vers le champ lointain n'est possible si aucun fluide nouveau ne pénètre dans le champ proche à partir de l'extérieur du dépôt. Si jamais le dépôt était inondé — éventualité fort improbable si le dépôt est bien construit — le transport de radionucléides vers le champ lointain dépendrait pour beaucoup de la configuration du dépôt.

Dans un dépôt en formation argileuse, en supposant que rien d'anormal ne se produise et qu'aucun parcours préférentiel ne s'établisse à travers la formation, la diffusion réglerait la migration des radionucléides. Dans une formation argileuse de dimensions appropriées et possédant les propriétés hydrauliques caractéristiques, on peut calculer que les radionucléides sorbables décroîtraient jusqu'à des niveaux insignifiants à quelques mètres des colis de déchets. D'autre part les radio-

nucléides qui ne s'adsorbent pas, tel l'iode 129, pourraient gagner le champ lointain et s'échapper en partie de la formation.

Pour un dépôt dans le tuf la sortie des radionucléides hors du champ proche dépendrait, comme dans d'autres types de roches, de leur vitesse de mobilisation et de l'importance de l'écoulement des fluides. Les espèces adsorbées seraient surtout freinées par leurs réactions avec des zéolites, minéraux secondaires formés par l'altération des cendres. L'efficacité du tuf en tant que barrière géochimique dépendra donc surtout de sa teneur en zéolites. En conséquence, si l'on veut évaluer le transport éventuel de radionucléides dans une formation de tuf, il faut posséder des données précises sur l'écoulement des fluides et la composition minéralogique de la roche.

Dans le basalte, la situation serait assez semblable à celle qui a été décrite pour le granite, car le transport des radionucléides résulterait de l'écoulement de l'eau par les fissures. La même incertitude régnerait au sujet des effets thermo-mécaniques sur la perméabilité des fissures et l'écoulement des eaux souterraines. Ces incertitudes peuvent être réduites si l'on connaît bien les données du site et compensées au moyen de barrières artificielles efficaces.

### **Etudes en cours et en projet**

La liste ci-après donne des exemples d'activités en cours ou projetées qui peuvent contribuer à une meilleure compréhension des effets en champ proche:

- recherches sur l'écoulement des eaux souterraines dans différents environnements géologiques
- études de la migration des radionucléides dans des roches et sous des conditions hydrogéologiques diverses
- vérification de modèles; notamment définition, quantification et vérification de certains paramètres
- étude de divers matériaux tampons y compris essais des masses tampons et analyse complète des résultats
- expérience de transfert de chaleur dans diverses roches-hôtes
- étude des déplacements des roches dus à la chaleur
- perfectionnement des méthodes d'évaluation du comportement des roches, y compris les effets des contraintes et de la fracturation
- comportement chimique et physico-chimique de certains radionucléides importants, par exemple les mécanismes de dissolution, de lixiviation, et de migration des actinides.