Sûreté radiologique des dépôts de déchets

Aperçu des méthodes et des difficultés

par Gordon Linsley

Au cours des dernières années, de nouvelles techniques d'analyse de la sûreté des dépôts de déchets sont apparues à mesure que, dans le monde entier, on s'attachait à trouver les meilleurs moyens de se débarrasser des déchets radioactifs. Pour aménager un complexe d'évacuation sûr et conforme aux critères radiologiques arrêtés par les autorités nationales, il faut tenir compte des résultats des analyses de sûreté.

Le présent article expose brièvement les principales caractéristiques des méthodes d'analyse de la sûreté, signale les domaines sensibles et expose des méthodes en fonction des résultats de certaines analyses de sûreté*.

Normes de radioprotection

La plupart des normes de radioprotection s'inspirent des recommandations de la Commission internationale de protection radiologique (CIPR). Elles prévoient notamment un système de limitation des doses qui repose sur trois principes fondamentaux: justification d'une pratique, optimisation de la protection et limitation de la radioexposition des individus.

Le système de limitation des doses a été institué pour protéger les personnes contre les dangers bien réels des radioexpositions professionnelles en cours d'exploitation ou lors des rejets périodiques d'effluents dans l'environnement.

En revanche, dans le cas de l'évacuation des déchets radioactifs, on n'a aucune certitude que des individus seront exposés à des rayonnements, les dépôts étant le plus souvent conçus pour assurer un isolement sur de très longues périodes. Aux fins d'analyse de la sûreté on envisage diverses éventualités qui pourraient donner lieu à la libération de radionucléides dans l'environnement et exposer des individus à des rayonnements, telles que la migration de radionucléides due à un défaut d'étanchéité du dépôt ou à la présence accidentelle d'un individu dans ce dépôt.

Les précautions prises lors de l'aménagement d'un dépôt sont telles que la probabilité de situations exposant des individus à des rayonnements est en général très faible. Les périodes qu'il convient d'envisager sont extrêmement longues en sorte que diverses questions se posent lorsqu'il s'agit d'arrêter, par exemple, des normes de protection valables pour les populations à venir, les prévisions en la matière étant soumises à un très grand nombre d'impondérables.

C'est pour tenir compte de ces problèmes très particuliers que l'on établit actuellement des critères de radioprotection spéciaux pour l'évacuation des déchets solides. Ce qui distingue ces nouveaux critères, c'est la tendance qui se dessine à limiter les risques (et non seulement les doses). En l'occurrence, on calcule le risque comme étant la probabilité qu'une dose de rayonnement soit reçue, multipliée par la probabilité que la dose reçue ait sur la santé des effets nuisibles. On peut ainsi mieux situer des éventualités qui auraient de graves conséquences radiologiques, par exemple l'endommagement d'un dépôt par un météorite, mais dont la probabilité est extrêmement faible.

Même si de tels critères rendent mieux compte de la nature du danger radiologique que présente l'évacuation souterraine des déchets solides, force est de reconnaître que dans la pratique, leur application peut présenter des

M. Linsley est membre de la Division du cycle du combustible nucléaire de l'Agence.

* On trouvera des directives quant aux méthodes d'évaluation de la sûreté dans les documents de la *Collection sécurité* de l'Agence relatifs à l'évacuation des déchets dans des formations géologiques, dans des installations à faible profondeur et dans les océans.

Ci-dessus: Les recherches in situ et les essais en laboratoire fournissent de précieux enseignements pour les études de sûreté des installations d'évacuation des déchets. (Photo: AIF)

difficultés. Tel est notamment le cas lorsqu'il s'agit de spécifier la probabilité qu'une situation donnant lieu à exposition se produise.

Méthodes d'évaluation de la sûreté

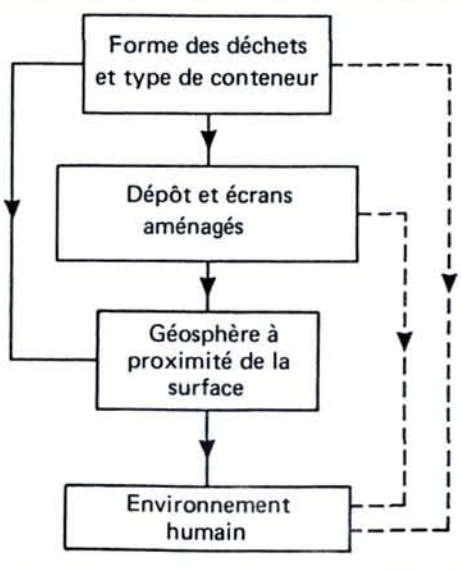
La plupart des principes applicables à l'évaluation de la sûreté d'une installation souterraine à faible profondeur s'appliquent également aux dépôts pour déchets de haute activité aménagés dans des formations géologiques profondes.

Pour une installation à faible profondeur, on peut dire que le complexe d'évacuation est une combinaison des éléments suivants (voir le schéma):

- Le type et la forme des déchets avec, le cas échéant, les éléments stabilisateurs, les conteneurs, les chemisages et les éléments retardateurs de la migration des radionucléides
- Le dépôt proprement dit avec les écrans qui y sont aménagés, notamment le remblai des excavations et la terre de recouvrement
- La géosphère à proximité de la surface (sédiments, roches) à l'emplacement du dépôt
- L'environnement humain (sol, eaux de surface, nappes aquifères à faible profondeur, atmosphère, faune et flore).

L'analyse de la sûreté d'un tel complexe comporte les trois éléments suivants:

- Détermination des phénomènes qui pourraient entraîner des rejets de radionucléides, influer sur le débit de ces rejets ou sur la vitesse de transport des radionucléides dans l'environnement
- Estimation des probabilités que de tels phénomènes se produisent et chiffrage de leurs effets sur le complexe d'évacuation
- Calcul des conséquences radiologiques des rejets (doses aux individus et aux populations et, le cas échéant, évaluation des effets qu'ils pourraient avoir sur leur santé).



Les radionucléides peuvent s'échapper d'un dépôt à faible profondeur et atteindre le milieu humain de diverses manières. Les lignes brisées représentent une situation anormale.

Les deux premiers points font généralement l'objet de l'analyse des éventualités, le troisième de l'analyse des conséquences.

Analyse des éventualités

Les phénomènes qui peuvent présenter un intérêt pour l'analyse des situations qui peuvent se produire dans les dépôts à faible profondeur sont essentiellement dus au fait de l'homme (par exemple travaux de construction, travaux agricoles, forages de prospection minière), à des phénomènes ou événements naturels (érosion, inondations, mouvements de la nappe phréatique) ainsi qu'à des phénomènes survenant dans les déchets et à l'intérieur du dépôt (émanations de gaz, perturbation mécanique du sol ou de la roche à l'emplacement même du dépôt).

Les résultats des analyses des éventualités permettent de définir les situations qui peuvent se produire (paramètres concernant les rejets et leur transport, nécessaires aux analyses des conséquences) et d'estimer les probabilités que ces situations se produisent en fonction du temps. Quand on procède à des analyses d'éventualités pour des complexes ou des emplacements bien précis, il est généralement possible d'écarter certains phénomènes qui ne semblent pas mériter une étude détaillée, soit que leur probabilité est très faible, soit qu'on puisse démontrer que leurs effets sont insignifiants.

Analyse des conséquences

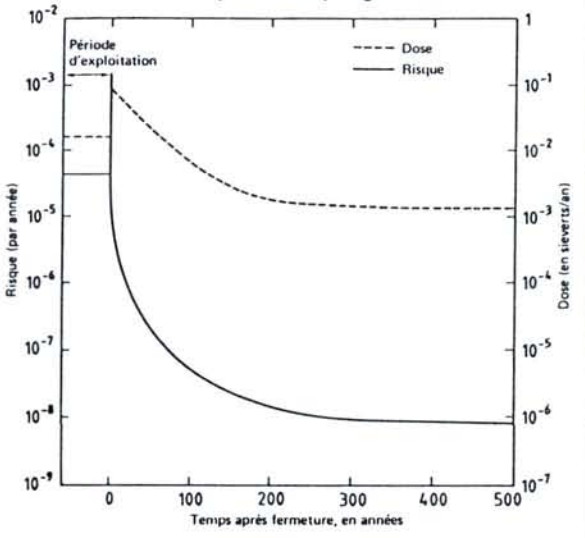
Une fois définies les éventualités de rejet au dépôt même, il faut estimer les conséquences qui peuvent en résulter pour les individus. A cette fin, il faut mettre au point un outil de calcul qui permette d'établir un modèle du transport des radionucléides dans l'environnement jusqu'à l'homme et d'évaluer les doses de rayonnements correspondantes.

Dans un premier temps, on établit une prévision des débits de rejet des radionucléides provenant du dépôt suivi d'estimations des concentrations de radionucléides dans les divers compartiments de l'environnement. Dans un deuxième temps, on établit une prévision des vitesses de transport des radionucléides libérés entre les divers compartiments d'une part, et qui parviennent à l'homme d'autre part. Le troisième et dernier temps consiste à prévoir l'interaction des radionucléides et des humains ce qui permet de calculer les doses aux individus et à la population pour chaque situation retenue dans l'analyse des éventualités.

Dans l'analyse des conséquences, on étudie comment les radionucléides libérés parviennent jusqu'à l'homme par différentes voies de transfert, par exemple l'eau de boisson, la consommation d'aliments aquatiques, les bains ou la natation et, de façon plus indirecte, les plantes et les animaux domestiques (les plantes peuvent accumuler des radionucléides par irrigation ou par l'intermédiaire de l'humus).

On peut exprimer de diverses manières les résultats de l'analyse globale de la sûreté, selon les critères radiologiques que l'on retient, par exemple probabilités, doses individuelles, risques individuels et doses et risques collectifs (voir encadré ci-joint pour les résultats d'une analyse générale).

Exemple d'analyse générale



On voit ici les résultats d'une étude générale des doses annuelles maximales aux individus ainsi que les risques correspondant à l'évacuation de déchets divers de faible activité dans une tranchée peu profonde avec minimum d'aménagements. Les éventualités envisagées étaient le contact avec l'eau, suivi d'une migration de radionucléides; des incendies dans la tranchée d'enfouissement pendant les opérations et des perturbations du fait de l'homme après fermeture du site et levée des restrictions. (Aux fins des calculs, on a admis que les restrictions d'accès au site étaient levées dès l'arrêt des opérations d'enfouissement.) On a estimé les doses individuelles maximales en admettant que tous les rejets postulés dans les éventualités avaient bien lieu, alors que, pour le calcul du risque individuel, on a tenu compte de la probabilité que les accidents considérés se produisent. Pour les périodes de temps indiquées, les risques potentiels pour les individus sont essentiellement imputables à des expositions qui pourraient avoir lieu lors d'excavations faites pour la construction de bâtiments et, ultérieurement, essentiellement du fait de travaux agricoles ou de transferts par les eaux. Un des grands avantages des études générales de ce type est qu'elles donnent une première estimation des périodes pendant lesquelles l'accès au site doit être interdit après la fin des opérations pour respecter les critères radiologiques (Source: Pinner et coll., Royaume-Uni, 1984).

Etudes générales et études particulières au site

Il est utile de faire un distinction entre études générales et études particulières au site. L'étude générale a généralement lieu au tout début de la planification alors que le site n'est peut-être pas encore choisi et que l'on ne possède pas assez de renseignements pour faire une évaluation valable. On est nécessairement amené à généraliser les hypothèses et les valeurs des paramètres à retenir pour l'établissement du modèle ne se trouvent peut-être que dans des ouvrages scientifiques spécialisés: ce choix relève de l'appréciation d'un expert rompu à ces problèmes. Pour les hypothèses et les données nécessaires à ces études, on a tendance à pécher par excès de prudence pour éviter d'aboutir à des sous-estimations en l'absence de renseignements plus précis.

Lest études générales sont précieuses en ce qu'elles servent à appeler l'attention sur des aspects qui ont toutes les chances d'être extrêmement importants du point de vue radiologique et, partant, permettent d'attribuer un ordre de priorité aux recherches. Elles indiquent en particulier les éventualités, les voies de transfert à l'homme et les radionucléides présents dans les déchets qui présentent le plus de risques. A mesure que l'on possède davantage de renseignements sur l'agencement du dépôt et sur l'emplacement qui sera retenu, on peut avancer des conclusions plus fondées et plus rigoureuses.

Une étude particulière au site est requise préalablement à toute autorisation d'y aménager un dépôt de déchets. Pour cette étude, on a recours à tous les renseignements que l'on peut recueillir concernant le dépôt, son emplacement et son environnement immédiat.

Au cours des dernières années, on a assisté dans plusieurs pays à une intensification progressive des mesures prises pour assurer la sûreté, qui vont d'études générales préliminaires à des études plus concrètes reprenant les données relatives à des dépôts et des environnements bien précis (voir l'encadré de la page 24 repris du projet Nagra-Gewähr qui représente les diverses étapes en question pour l'évacuation souterraine de déchets de haute activité).

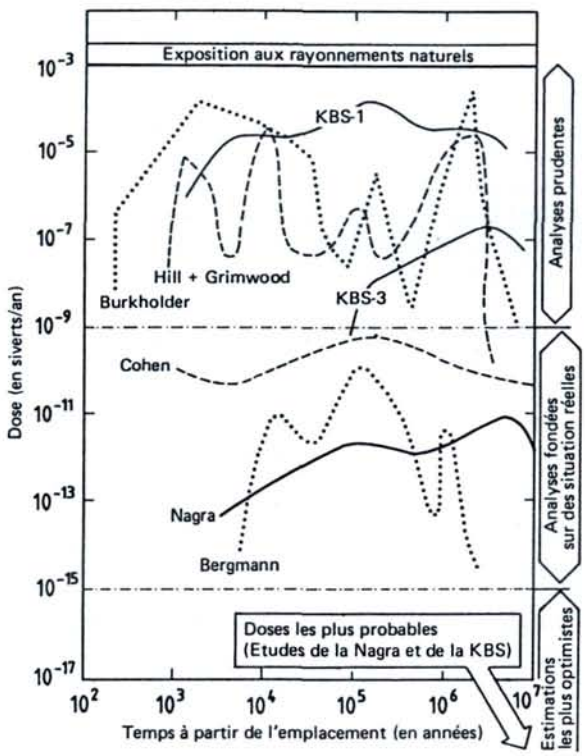
Crédit à accorder aux prévisions établies à l'aide de modèles

L'évaluation de la sûreté des dépôts de déchets radioactifs dépend pour une large part de l'emploi de modèles mathématiques et il convient de voir quelle confiance on peut accorder à leurs prévisions.

Les prévisions de tous les modèles de l'environnement sont sujettes à caution vu que ces modèles sont des représentations simplifiées d'ensembles de facteurs complexes et les incertitudes qui en résultent sont particulièrement difficiles à lever dans l'étude de la sûreté des dépôts de déchets radioactifs. En effet, les résultats des expériences et les mesures de l'environnement susceptibles de présenter un intérêt direct aux fins de validation sont difficiles à obtenir notamment compte tenu des longues périodes de temps sur lesquelles les modèles portent. Les spécialistes de la sûreté ont néanmoins plusieurs possibilités d'accroître la confiance dans les résultats obtenus sur modèle.

- Pour bien faire, il faudrait valider le modèle en comparant ses prévisions avec des résultats observés dans la réalité. S'il n'est pas possible de valider les modèles dans tous les détails, il est cependant possible de valider partiellement des sous-produits par le biais de données obtenues tant en laboratoire que sur le terrain.
- Dans certains cas, on peut procéder à des validations moins systématiques en faisant des comparaisons avec des dépôts naturels contenant des radionucléides d'origine naturelle, tels que ceux d'Oklo au Gabon et de Morro de Ferro au Brésil. On a ici l'avantage d'avoir des preuves irréfutables de phénomènes de transport sur des périodes très longues, dont il convient de tenir compte pour l'évacuation souterraine des déchets. Les difficultés que présentent ces types de validation sont que les conditions expérimentales ne sont généralement pas bien comprises et qu'elles peuvent ne pas être directement applicables à l'environnement du dépôt.
- Une méthode de tourner la difficulté que présentent les incertitudes propres au modèle consisterait à recourir à des modèles représentatifs des situations les plus défavorables. Certes, en procédant de cette manière, on

Progression des études de sûreté



On voit ici les résultats (doses annuelles calculées) obtenus à partir de diverses études de sûreté sur l'évacuation définitive de déchets de haute activité et d'éléments combustibles épuisés. Bien que les études portent sur divers types de déchets, de confinements, de dépôts et d'environnements géologiques, on constate que les doses individuelles prévues ont tendance à baisser à mesure que les évaluations se fondent davantage sur la réalité. La Suède a fait des études probablement les plus complètes à ce jour (KBS-1 pour les déchets de haute activité vitrifiés, en 1978, et KBS-3 pour les combustibles irradiés non traités, en 1983). Ces deux études ont trait à des évacuations dans de la roche granitique; les données géologiques, hydrogéologiques et géochimiques ont été établies à partir des résultats de recherches particulières faites in situ. Les études de la KBS ont été faites pour le compte du Gouvernement suédois qui les a retenues *comme exemple de méthodes de gestion et comme base* de décision pour toute attribution de licences d'exploitation de centrales nucléaires en Suède. Les études faites par la Nagra en Suisse ont un but analogue. L'expérience acquise lors de certains travaux antérieurs a beaucoup contribué à faire mieux comprendre le comportement des dépôts et à établir des méthodes d'analyse. Les calculs sur modèle de Burkholder (Etats-Unis, 1976) étaient des études générales sur l'évacuation de déchets de haute radioactivité dans des sols poreux. Ceux de Hill et Grimwood (Royaume-Uni, 1978) étaient des études générales sur l'évacuation dans des roches cristallines de déchets de haute activité vitrifiés. L'intérêt de ces études réside notamment dans les analyses de sensibilité qui ont été faites à cette occasion pour déterminer l'importance relative de chacun des paramètres retenus pour les barrières protectrices et dans la possibilité qu'elles donnent de formuler des critères pour le choix des emplacements de dépôts. Les études de Bergmann (Etats-Unis, 1978) concernaient l'évacuation définitive des déchets de haute activité dans des formations salines et schisteuses en général. Pour les évacuations dans le sel ou l'anhydrite, on ne prévoit normalement aucun risque de radioexposition dû à une migration de radionucléides; ces roches ne contenant pas d'eau, aucun dégagement d'activité par les voies dites normales n'est à craindre. Ce n'est en général que si un accident hypothétique, tel que pénétration d'eau par suite de fissuration ou endommagement du dépôt, du fait de l'homme, vient à se produire que de fortes radioexpositions sont à craindre. (Source: Projet Gewähr de la Nagra, Suisse, 1985).

n'a aucune indication de la rigueur des prévisions; du moins peut-on être certain qu'elles ne risquent guère de pécher par excès d'optimisme. On peut appliquer cette méthode pour démontrer que les doses restent bien en dessous des limites, par exemple dans les études générales évoquées plus haut.

- Les comparaisons des résultats obtenus sur modèles ont un rôle prééminent dans les études de sûreté. Elles permettent de vérifier la précision numérique des programmes de modélisation et, de plus, peuvent servir à comparer différents cheminements intellectuels adoptés pour prévoir les transferts de radionucléides dans certaines circonstances bien définies. On en tire souvent de précieux enseignements. Divers programmes de comparaison de modèles intéressant l'évacuation souterraine des déchets ont lieu actuellement à l'échelon international, par exemple le programme INTRACOIN (modèles de transport à grandes distances de radionucléides dans la géosphère), le programme HYDRACOIN (modèles de transport dans les eaux souterraines) et le programme BIOMOVS (modèles de transport de radionucléides dans la biosphère).
- On peut recourir à des méthodes statistiques pour déterminer l'effet que les incertitudes quant aux valeurs de chacun des paramètres introduits dans le modèle peuvent avoir sur la rigueur des prévisions globales obtenues avec le modèle. Il convient cependant de ne pas perdre de vue que de telles analyses des incertitudes ne donnent aucune garantie de la validité du modèle considéré.

Il n'est pas facile de prouver que les prévisions concernant la migration de radionucléides à partir de dépôts souterrains offrent toutes garanties, et souvent on n'y parvient que de manière indirecte. On ne peut attacher foi aux prévisions faites à l'aide de modèles qu'en combinant plusieurs techniques telles que comparaison des modèles de validation et analyse des paramètres d'incertitude.

Les recherches se poursuivent

Pour résumer, les résultats des études de sûreté montrent que les incidences radiologiques des dépôts de déchets seront minimes et qu'il est possible de respecter les normes de radioprotection. Il n'en reste pas moins que ces évaluations sont entachées d'énormes incertitudes, notamment en raison de la longueur des périodes de temps considérées. Une bonne part des travaux de recherche menés dans ce domaine visent à réduire ces incertitudes.

Il est intéressant de constater que la majeure partie des progrès réalisés dans ce domaine sont dus à des travaux menés à l'échelon international lors de programmes de comparaison et de validation et d'échanges de vues dans des instances internationales.