

Guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde

HISTORIQUE DES REVISIONS

Indice	Date	Commentaires
0	12 février 2008	Création

	Rédacteur/Modificateur	Vérificateur	Approbateur
NOM	P. BODENEZ	J. RIEU	JC. NIEL
VISA			

SOMMAIRE

1. PREAMBULE.....	4
2. OBJET DE LA REGLE.....	4
3. DOMAINE D'APPLICATION DE LA REGLE ET DEFINITIONS	4
3.1. Définitions.....	4
3.2. Déchets radioactifs concernés.....	5
3.3. Formations géologiques concernées.....	5
3.4. Situations étudiées.....	5
3.5. Réversibilité du stockage.....	6
3.6 Contrôle des matières nucléaires.....	6
4. OBJECTIF FONDAMENTAL.....	6
4.1. Objectif.....	6
4.2. Critères de radioprotection	7
4.2.1. Situation de référence.....	7
4.2.2. Situations dites altérées.....	7
5. BASES DE CONCEPTION LIEES A LA SURETE	8
5.1. Principes et fonctions de sûreté	8
5.2. Colis de déchets	10
5.3. Le milieu géologique - critères techniques de choix de site	11
5.4. Les composants ouvragés.....	12
5.5. Le concept de stockage.....	13
5.6. Le programme de surveillance.....	14
6. Démonstration de la sûreté après fermeture de l'installation de stockage	14
6.1 Vérification du caractère favorable des performances des composants.....	14
6.2. Evaluation des perturbations induites dans le système de stockage	15
6.3. Evaluation des expositions individuelles.....	15
6.4. Situations prises en compte	16
6.4.1. Situation de référence.....	16
6.4.2. Situations altérées.....	16
6.5. Modélisation de l'évolution du système de stockage.....	17
6.6. Biosphère.....	17
6.7 Prise en compte des incertitudes et études de sensibilité	18
6. Assurance de la qualité.....	19
ANNEXE 1	20
Orientations relatives aux colis de déchets et aux investigations à mener sur le site	20
A1 – 1 COLIS DE DECHETS	20
A1- 1.1 Connaissance des colis de déchets	20
A1-1.2 Acceptabilité des déchets en stockage	21
A1-2 INVESTIGATIONS A MENER SUR UN SITE	22
A1-2.1 Etudes géologiques.....	22
A1-2.1.1 Phénomènes géologiques à long terme.....	22
A1-2.1.2 Mesures hydrogéologiques.....	22
A1-2.1.3 Modélisations thermiques, hydriques et mécaniques.....	22
A1-2.1.4 Analyse des propriétés géochimiques.....	22
A1-2.2 Investigations à mener en surface	23

A1-2.2.1 Objectifs	23
A1.2.2.2 Investigations depuis la surface	23
A1.2.2.3 Forages de reconnaissance	23
A1-2.2.4 Étude des matériaux extraits des forages.....	24
A1-2.3 Investigations à mener dans un laboratoire souterrain	24
A1-2.3.1 Objectifs des investigations	24
A1-2.3.2 Mesures in situ et sur échantillons.....	25
A1-2.4 Mise en place d'une instrumentation de mesure pour le suivi de l'évolution du site pendant les phases d'exploitation et de réversibilité de l'installation de stockage	25
A1-3 RECOMMANDATIONS PARTICULIÈRES RELATIVES AUX DIFFÉRENTS TYPES DE SITES	26
A1-3.1 Sites cristallins	26
A1-3.1.1 Recommandations spécifiques aux sites granitiques.....	26
A1.3.1.2 Recommandations spécifiques aux sites schisteux	26
A1-3.2 Sites en formation salifère	27
A1-3.3 Sites en formation argileuse.....	28
ANNEXE 2	29
Sélection de situation à étudier dans le cadre de l'analyse de sûreté	29
A2-1. SITUATION DE RÉFÉRENCE	29
A2-1.1. Evolution du système due à la présence de l'installation de stockage.....	29
A2-1.2. Evolution du système dues aux événements naturels	29
A2-1.2.1. Cycles climatiques	29
A2-1.2.2. Mouvements verticaux	29
A2-1.2.3. Activité sismique	29
A2-2. SITUATIONS DITES ALTÉRÉES	30
A2-2.1. Situations altérées liées à des événements naturels	30
A2-2.1.1. Cycles climatiques d'amplitudes exceptionnelles.....	30
A2-2.1.2. Mouvements verticaux exceptionnels	30
A2-2.1.3. Activité sismique exceptionnelle.....	30
A2-2.2. Situations altérées liées à l'activité humaine	30
A2-2.2.1. Intrusion humaine.....	30
A2-2.2.2. Défaut d'un composant.....	32

	<p>Guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde</p>	<p>Indice 0 Version du 12/02/2008</p>
--	---	---

1. PREAMBULE

L'organisme chargé de l'étude du stockage de déchets radioactifs en formation géologique profonde devra rendre compte à l'ASN des conditions d'application de la présente règle.

2. OBJET DE LA REGLE

L'objet de la présente règle est de définir, pour le stockage de déchets radioactifs en formation géologique profonde, les objectifs qui doivent être retenus, dès les phases d'investigations d'un site et de conception de l'installation de stockage, pour permettre d'en assurer la sûreté après la fermeture de l'installation de stockage.

Elle traite des points suivants :

- les objectifs de protection de la santé des personnes et de l'environnement,
- les principes de sûreté et les bases de conception de l'installation de stockage liées à la sûreté,
- la méthode de démonstration de la sûreté du stockage.

Elle est conforme aux dispositions des articles L542-1 à L542-14 du code de l'environnement, des articles L1333-1 à L1333-20 du code de la santé publique et des décrets pris pour leur application, à la loi de programme n°2006-739 du 28 juin 2006 relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs, ainsi qu'à la convention commune sur la sûreté de la gestion du combustible usé et sur la sûreté de la gestion des déchets radioactifs.

Elle prend en compte les résultats des travaux effectués dans le cadre de la loi n°91-1381 du 30 décembre 1991 relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs, ainsi que les recommandations formulées par les organisations internationales techniquement compétentes (Agence Internationale de l'Énergie Atomique [AIEA], Agence de l'Énergie Nucléaire [AEN] de l'Organisation de Coopération et de Développement Économique [OCDE] et Commission Internationale de Protection Radiologique [CIPR]).

3. DOMAINE D'APPLICATION DE LA REGLE ET DEFINITIONS

3.1. Définitions

Conformément à l'article L542-1-1 du code de l'environnement :

- « une substance radioactive est une substance qui contient des radionucléides, naturels ou artificiels, dont l'activité ou la concentration justifie un contrôle de radioprotection » ;
- « les déchets radioactifs sont des substances radioactives pour lesquelles aucune utilisation ultérieure n'est prévue ou envisagée » ;
- « un combustible nucléaire est regardé comme combustible usé lorsque, après avoir été irradié dans le cœur d'un réacteur, il en est définitivement retiré » ;
- « Les déchets radioactifs ultimes sont des déchets radioactifs qui ne peuvent pour plus être traités dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de leur part valorisable ou par réduction de leur caractère polluant ou dangereux. »
- « le stockage de déchets radioactifs est l'opération consistant à placer ces substances dans une installation spécialement aménagée pour les conserver de façon potentiellement définitive dans le respect des principes énoncés à l'article L542-1 du code de l'environnement.

	<p>Guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde</p>	<p>Indice 0 Version du 12/02/2008</p>
--	---	---

- « le stockage en couche géologique profonde de déchets radioactifs est le stockage de ces substances dans une installation souterraine spécialement aménagée à cet effet, dans le respect du principe de réversibilité ».

Le système de stockage en formation géologique profonde est constitué des colis de déchets, de l'installation de stockage et du milieu géologique. L'installation de stockage comprend les ouvrages de stockage des colis de déchets et les ouvrages d'accès. Dans la présente règle, l'installation est considérée comme fermée dès lors que les voies qui y donnaient accès depuis la surface ont toutes été comblées. Le milieu géologique est constitué par les formations géologiques du site et notamment par la roche hôte. Il exclut les couches superficielles dès lors que celles-ci peuvent être fortement perturbées. La roche hôte est la formation géologique au sein de laquelle seront disposés les ouvrages de stockage contenant les colis de déchets.

Les composants du système de stockage qui ont généralement un rôle dans la sûreté après la fermeture de l'installation de stockage sont regroupés en trois classes :

- les colis de déchets dans lesquels les substances radioactives sont incorporées. Dans la suite du texte, le terme colis correspond au colis de stockage tel que mis en place dans l'installation. Il s'agit des déchets tels que conditionnés par les producteurs, ayant éventuellement fait l'objet d'un conditionnement supplémentaire (ajout d'un dispositif de surcolisage) en vue de leur conférer les propriétés requises pour la sûreté du stockage ;
- les composants ouvrages. Il s'agit des composants assurant le comblement des cavités de stockage et des forages, le remblayage et le scellement des galeries, ainsi que des ouvrages de liaison jour-fond ;
- la roche hôte.

3.2. Déchets radioactifs concernés

L'installation de stockage de déchets radioactifs en formation géologique profonde est conçue pour recevoir les déchets radioactifs ultimes qui, après leur entreposage, ne peuvent pour des raisons de sûreté ou de radioprotection être stockés en surface ou en faible profondeur. Il pourra s'agir notamment :

- des déchets de moyenne activité massique contenant des radionucléides de période longue en quantité telle qu'elle ne permettrait leur stockage, ni dans une installation de stockage de déchets de faible et moyenne activité à vie courte en surface, ni dans une installation de stockage de déchets de faible activité à vie longue ;
- des déchets de haute activité massique et contenant des quantités significatives de radionucléides de période longue. Ces déchets sont principalement issus du traitement du combustible usé et se caractérisent par un dégagement de chaleur important ;
- des combustibles usés qui ne feraient pas l'objet de traitement.

3.3. Formations géologiques concernées

La règle n'exclut a priori aucun type de formation géologique dans la mesure où les formations considérées respectent les critères essentiels présentés au chapitre 4.

3.4. Situations étudiées

Dans le cadre de l'analyse de sûreté, les situations suivantes seront étudiées (cf. chapitre 5 et annexe 2) :

- une situation de référence correspondant à l'évolution prévisible de l'installation de stockage et du milieu géologique sous l'effet des événements certains ou très probables ;

- des situations dites altérées correspondant à l'occurrence d'événements incertains, mais plausibles, soit naturels, soit liés aux actions humaines, qui se superposent à la situation de référence et peuvent conduire à une accélération de la migration de substances radioactives entre les ouvrages de stockage et la biosphère.

3.5. Réversibilité du stockage

Le code de l'environnement dispose à l'article L542-1-1 que le stockage de déchets radioactifs en formation géologique profonde s'effectue « dans le respect du principe de réversibilité » et à l'article L542-10-1 que les conditions de la réversibilité seront fixées par une loi.

La réversibilité du stockage suppose des modes d'exploitation adaptés, ainsi que des moyens de surveillance de l'installation. Les objectifs de la surveillance sont précisés au paragraphe 4.6.

Les dispositions prises pour assurer la réversibilité du stockage ne doivent pas compromettre la sûreté en exploitation et la sûreté après fermeture de l'installation de stockage.

3.6 Contrôle des matières nucléaires

Les garanties pour le contrôle des matières nucléaires, telles que définies dans le Code de la défense, doivent être prises en considération dès les phases de conception de l'installation de stockage. Les dispositions prises pour assurer ce contrôle ne doivent pas compromettre la sûreté en exploitation et la sûreté après fermeture de l'installation de stockage.

4. OBJECTIF FONDAMENTAL

4.1. Objectif

La protection de la santé des personnes et de l'environnement constitue l'objectif fondamental de sûreté assigné au stockage des déchets radioactifs en formation géologique profonde. Elle doit être assurée envers les risques liés à la dissémination de substances radioactives et de toxiques chimiques.

Après la fermeture de l'installation de stockage, la protection de la santé des personnes et de l'environnement ne doit pas dépendre d'une surveillance et d'un contrôle institutionnel qui ne peuvent pas être maintenus de façon certaine au-delà d'une période limitée.

En conséquence, le milieu géologique est choisi et l'installation de stockage est conçue de telle sorte que sa sûreté après fermeture soit assurée de façon passive afin de protéger les personnes et l'environnement des substances radioactives et des toxiques chimiques contenus dans les déchets radioactifs, sans qu'il soit nécessaire d'intervenir.

A cet égard, le concept retenu pour le stockage devra permettre de maintenir l'impact radiologique au niveau le plus faible qu'il est raisonnablement possible d'atteindre, compte tenu de la connaissance scientifique acquise, de l'état des techniques et des facteurs économiques et sociaux.

Les caractéristiques du site retenu, l'implantation de l'installation de stockage, la conception des composants artificiels (colis, composants ouvragés) et la qualité de leur réalisation constituent le fondement de la sûreté du stockage. Il convient donc de s'assurer de leur adéquation à l'objectif fondamental. Dans ce cadre, des évaluations de l'impact radiologique et chimique seront effectuées pour vérifier que l'objectif est bien atteint. En ce qui concerne l'impact radiologique, les critères de radioprotection sont présentés ci-après. En ce qui concerne les toxiques chimiques, l'acceptabilité de l'impact qu'ils peuvent générer devra être appréciée en fonction de critères réglementaires ou, à défaut, de recommandations disponibles.

	<p>Guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde</p>	<p>Indice 0 Version du 12/02/2008</p>
--	---	---

4.2. Critères de radioprotection

Pour la phase d'exploitation, les critères de radioprotection sont ceux appliqués aux installations nucléaires de base et sont en conformité avec les dispositions du code du travail (Art. R231-75 inséré par décret n°2003-296 du 31 mars 2003) et du code de la santé publique (Art. R1333-8 modifié par décret n°2006-676 du 8 juin 2006) relatives respectivement à la protection des travailleurs et à la protection générale des personnes.

Pour la phase succédant à la fermeture de l'installation, les analyses de sûreté présentées comprendront la détermination des expositions individuelles exprimées en dose efficace. On supposera la constance des caractéristiques de l'homme (sensibilité aux rayonnements, habitudes alimentaires, conditions de vie, connaissances générales actuelles, notamment dans les domaines technique et médical).

4.2.1. Situation de référence

Pour la situation de référence après la fermeture de l'installation de stockage, les doses efficaces individuelles calculées ne devront pas excéder la valeur de 0,25 mSv/an pour des expositions prolongées liées à des événements certains ou très probables.

Les évaluations des expositions individuelles seront fondées sur une modélisation de l'évolution du système de stockage, en particulier des colis et des composants ouvragés, ainsi que sur une modélisation de la circulation des eaux souterraines et de la migration des substances radioactives en solution et sous forme gazeuse.

Les événements à considérer sont :

- les événements liés à la présence de l'installation de stockage, aux défauts de réalisation et à l'ensemble des processus de dégradation progressive des colis et des composants ouvragés,
- un ensemble d'événements naturels probables (cycles climatiques, subsidence, surrection, mouvements sismiques).

La stabilité (qui englobe une évolution limitée et prévisible) du milieu géologique devant, selon les critères du sous-chapitre 4.3, être démontrée pour une période d'au moins 10 000 ans, la valeur des résultats des prévisions portant sur cette période devrait pouvoir être attestée de façon objective, notamment sur la base d'études d'incertitudes explicites. La contrainte de dose de 0,25 mSv/an sera retenue pour vérifier que la conception du stockage satisfait l'objectif fondamental de sûreté. Son dépassement doit conduire, soit à réduire les incertitudes par un programme de recherche adapté, soit à réviser la conception de l'installation.

Au-delà de cette période, les incertitudes sur l'évolution de l'environnement du système de stockage augmentent progressivement. Des estimations quantifiées majorantes des expositions individuelles devront néanmoins être faites, éventuellement complétées par des appréciations qualitatives des résultats de ces estimations compte tenu des facteurs d'évolution du milieu géologique, de façon à vérifier que le relâchement des substances radioactives ne conduit pas à des doses inacceptables. Lors de cette vérification, la valeur de 0,25 mSv/an précédemment citée sera conservée comme référence.

4.2.2. Situations dites altérées

Après la fermeture de l'installation de stockage, certains événements incertains, mais plausibles, naturels ou liés à des actions humaines, peuvent perturber l'évolution du système de stockage et par conséquent modifier la migration des substances radioactives. Certaines situations résultant de ces événements pourraient éventuellement conduire à des expositions individuelles plus élevées que celles associées à la situation de référence.

	<p>Guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde</p>	<p>Indice 0 Version du 12/02/2008</p>
--	---	---

Pour maintenir une cohérence entre la limitation des expositions individuelles dans la situation de référence et le traitement des expositions individuelles potentielles liées à des situations altérées, la notion de risque (produit de la probabilité de la situation par l'effet de l'exposition associée) peut être utilisée pour tenir compte de la probabilité de chaque situation donnant lieu à une exposition.

Cependant, la définition d'un critère fondé sur une limitation du risque individuel ne peut pas se faire sans précautions, dans la mesure où il impliquerait une équivalence discutable entre réduction de la probabilité et réduction des expositions individuelles.

En outre, il faut s'attendre à des difficultés, voire à des impossibilités, dans l'estimation des probabilités des événements pouvant conduire à des expositions.

Dans ces conditions, le caractère acceptable des expositions individuelles associées à l'occurrence d'événements incertains, mais plausibles, sera apprécié en tenant compte des caractéristiques de la situation qui en résulte, de sa probabilité lorsqu'elle pourra être déterminée, du niveau, de la durée, de l'extension et de la nature des transferts de substances radioactives dans la biosphère, des caractéristiques des voies d'atteinte de l'homme et des groupes exposés.

Par ailleurs, la possibilité d'interventions en vue de limiter les conséquences, dans le cas où des situations du type considéré viendraient à se produire, ne doit évidemment pas être retenue lors de la conception pour assurer la sûreté du stockage après sa fermeture.

C'est pourquoi les expositions individuelles associées aux situations altérées dont il apparaît qu'elles doivent être retenues pour la conception du stockage doivent être maintenues suffisamment faibles par rapport aux niveaux susceptibles d'induire des effets déterministes.

Hormis la comparaison des doses individuelles efficaces calculées aux valeurs indiquées, qu'il s'agisse de la situation de référence ou des situations altérées, l'appréciation du caractère acceptable de l'impact radiologique du stockage résulte avant tout de l'analyse des efforts faits par le concepteur du stockage pour que les expositions individuelles soient aussi faibles que raisonnablement possible, compte tenu des facteurs économiques et sociaux.

5. BASES DE CONCEPTION LIEES A LA SURETE

5.1. Principes et fonctions de sûreté

Au sens le plus général, la sûreté du stockage repose sur un ensemble de composants (voir sous-chapitres 4.2, 4.3 et 4.4) et de dispositions (voir sous-chapitre 4.5) empêchant ou limitant la migration des substances radioactives ou des toxiques chimiques vers la biosphère, de manière à protéger l'homme et l'environnement.

Les principes de sûreté définissent les orientations fondamentales qui doivent être suivies pour concevoir le système de stockage. Celui-ci doit être conçu selon une approche relevant du principe de défense en profondeur, principe internationalement retenu pour la conception et l'exploitation des installations nucléaires. Sa conception doit satisfaire tout particulièrement à permettre une démonstration aisée de son bon fonctionnement après fermeture. Le principe de défense en profondeur, pour les installations nucléaires, conduit à la mise en place de lignes de défense successives aptes à prévenir l'apparition ou, le cas échéant, à limiter les conséquences de défaillances techniques, humaines ou organisationnelles susceptibles de conduire à des situations accidentelles pouvant affecter la protection de l'homme ou de l'environnement.

La sûreté après la fermeture de l'installation de stockage géologique est un sujet essentiel qui doit guider la conception du système de stockage. L'impossibilité de prévoir des interventions à cette échéance conduit à prévoir des dispositions passives. Pour la sûreté après la fermeture de l'installation de stockage géologique, la mise en place de lignes de défense successives lors de la conception du

	<p>Guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde</p>	<p>Indice 0 Version du 12/02/2008</p>
--	---	---

système de stockage se traduit par l'attribution aux différentes classes de composants du système (voir sous-chapitre 2.1) de diverses fonctions de sûreté complémentaires. Ce principe a pour effet de faire reposer la sûreté du stockage sur la complémentarité et la diversité des classes de composants et sur un certain niveau de redondance des fonctions de sûreté de telle sorte que des défaillances plausibles de composants ne compromettent pas, à elles seules, la sûreté de l'installation.

Les fonctions de sûreté du système de stockage visent à assurer le respect de l'objectif de protection de la santé des personnes et de l'environnement pendant toutes les phases de vie de l'installation de stockage. Elles sont remplies par des composants du système de stockage.

Les fonctions de sûreté du système de stockage après la fermeture de l'installation sont les suivantes :

- s'opposer à la circulation de l'eau dans l'installation de stockage,
- confiner la radioactivité,
- isoler les déchets de l'homme et de la biosphère pour que la sûreté du stockage ne soit pas affectée de façon significative par les phénomènes d'érosion climatiques ou par les activités humaines banales.

La performance du système de stockage est à mettre en regard de la nocivité des substances contenues dans l'installation et de l'évolution de cette nocivité. La probabilité de perte partielle ou totale d'une fonction d'un composant doit être d'autant plus faible que le potentiel radiotoxique des déchets stockés est élevé. Ainsi, les fonctions devront être assurées pendant une durée suffisante, compte tenu de leurs rôles respectifs dans la sûreté globale du stockage et de la décroissance des radionucléides contenus dans les déchets. La durée et la qualité du confinement doivent être définies en fonction de la nature du déchet.

Un composant du système de stockage peut participer à une ou plusieurs fonctions de sûreté pendant une période de temps spécifiée.

Les fonctions de sûreté de la roche hôte doivent être préservées, malgré les effets dus aux événements géologiques susceptibles de se produire, tant que la dissémination de l'activité résiduelle des déchets stockés est susceptible d'entraîner des expositions individuelles inacceptables lors de tels événements.

La possibilité de tenir compte d'un rôle complémentaire à long terme des formations encaissantes au-delà de la roche hôte pourrait être envisagée lorsque celles-ci présentent une capacité naturelle de dilution, de retard et de dispersion des substances radioactives. Les dispositions de conception devront alors être telles qu'elles préservent cette capacité naturelle de dilution et de dispersion.

La capacité des différents composants du système de stockage à atteindre les performances visées doit être mise en regard des incertitudes sur l'évolution du système de stockage et de son environnement. Ainsi, il convient d'adopter des dispositions de conception et de réalisation, ainsi que des méthodes permettant de démontrer que les performances attendues des composants du système de stockage seront réalisées compte tenu des perturbations raisonnablement envisageables auxquelles le système de stockage pourra être soumis. A cette fin, l'évolution du système de stockage devra pouvoir être décrite sur une période de temps suffisamment longue. Une attention particulière doit être portée à la faisabilité technique des colis et des composants ouvragés, ainsi qu'aux techniques et aux moyens de contrôle permettant de s'assurer de la qualité de leur réalisation et de justifier le degré de confiance acquis dans la capacité de ces composants à remplir leurs fonctions.

Des objectifs quantitatifs pour les performances des différents composants du système de stockage ne seront valablement fixés qu'à l'issue d'un processus itératif, intégrant l'expérience acquise au cours de l'étude de la sûreté du stockage. C'est pourquoi une approche prudente est retenue, consistant à choisir ou concevoir chacun des composants des différentes classes aussi efficace que raisonnablement possible compte tenu, d'une part de son rôle dans la sûreté globale du système de

	<p>Guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde</p>	<p>Indice 0 Version du 12/02/2008</p>
--	---	---

stockage, d'autre part de l'état des connaissances, des techniques disponibles et des facteurs économiques.

5.2. Colis de déchets

Les dispositions décrites ci-après concernent le colis stocké, ou colis de stockage, c'est-à-dire le premier composant du système de stockage sous sa forme définitive, tel que mis en place dans l'installation de stockage. Les colis participent à la sûreté de l'installation de stockage en phase d'exploitation, ainsi qu'autant que nécessaire à la sûreté du stockage après fermeture de l'installation.

Le colis devra présenter une capacité à confiner les substances nocives adaptée à la nature des déchets qu'il contient, compte tenu de l'environnement dans lequel il se trouve. Pour répondre à cet objectif, il est recommandé que le colis :

- empêche la dissémination d'activité dans les autres composants du système de stockage pendant une période donnée après sa mise en place dans l'installation.
 - Pour les déchets de haute activité massique et les combustibles usés, ce confinement sera notamment assuré pendant une période au terme de laquelle la température au contact des colis sera suffisamment faible pour que d'éventuels relâchements s'opèrent dans des conditions connues.
 - Pour les colis de déchets de moyenne activité, ce confinement concerne les substances radioactives non gazeuses. Il sera assuré au moins pendant la phase d'exploitation.
 - Les colis de déchets de haute activité massique et de combustibles usés devront être conçus de sorte que cette capacité de confinement soit conservée pour une gamme de variation des conditions de stockage raisonnablement envisageable et, en tout état de cause, en cas d'occurrence d'un événement incertain, mais plausible, entraînant la création d'un « court-circuit » du milieu géologique survenant avant que l'activité des radionucléides à vie courte et moyenne contenue dans l'installation de stockage ait décliné suffisamment pour que la dissémination de l'activité n'entraîne pas d'expositions individuelles inacceptables.
- limite les relâchements de substances radioactives, après la perte partielle ou totale de l'étanchéité du dispositif mis en place pour participer à la fonction de confinement.

Les caractéristiques des colis participant à la sûreté du stockage après la fermeture de l'installation devront être compatibles avec celles recherchées pour la sûreté de l'installation en phase d'exploitation. Les caractéristiques qui devront être recherchées pour les colis lors de la conception sont présentées dans l'annexe 1.

Il faudra veiller à ce que les perturbations apportées par les colis dans le système de stockage n'engendrent pas d'effets négatifs préjudiciables aux fonctions de sûreté auxquelles participent les composants ouvrages et la roche hôte.

Des études dont l'objectif consistera à permettre l'évaluation des performances des colis, à fournir les éléments nécessaires à la démonstration de sûreté et à estimer l'influence des colis sur les performances des autres composants du système de stockage devront être menées.

Conformément à l'article L542-1-2 du code de l'environnement (« *Après entreposage, les déchets radioactifs ultimes ne pouvant pour des raisons de sûreté nucléaire ou de radioprotection être stockés en surface ou en faible profondeur font l'objet d'un stockage en couche géologique profonde* »), la conception du système de stockage devra s'attacher à permettre la prise en charge des déchets déjà conditionnés et décrits par les exploitants nucléaires selon les dispositions du chapitre 1 de l'annexe 1 de la présente règle.

	<p>Guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde</p>	<p>Indice 0 Version du 12/02/2008</p>
--	---	---

La connaissance des caractéristiques des colis de déchets produits, en cours de fabrication ou dont la fabrication est prévue, est nécessaire pour que leurs propriétés puissent être prises en compte dans la conception du système de stockage.

5.3. Le milieu géologique - critères techniques de choix de site

Le milieu géologique isole les déchets des activités humaines et des perturbations géologiques de surface. Il s'oppose à la circulation d'eau au contact des composants ouvrages et des colis de déchets. Le rôle du milieu géologique, en particulier de la roche hôte, consiste également à confiner les substances radioactives relâchées en assurant une migration très lente et en favorisant les phénomènes de sorption dans les terrains traversés.

Les investigations à mener sur le site pour caractériser les propriétés du milieu géologique doivent être guidées par des protocoles rigoureux ajustés aux besoins des modélisations quantitatives et aux spécificités du milieu géologique, mettant en œuvre les méthodes et outils les mieux adaptés. A cet égard, l'annexe 1 présente des orientations relatives aux investigations à mener sur le site, depuis la surface et en laboratoire souterrain.

Les investigations doivent être réalisées en veillant à ce que l'échelle d'observation soit compatible avec l'échelle d'une installation de stockage.

Les critères essentiels de choix d'un site sont les suivants :

- Stabilité

La stabilité du milieu géologique devra être telle que les éventuelles modifications des conditions initiales dues aux phénomènes naturels qui peuvent survenir (glaciation, sismicité, mouvements néotectoniques) restent acceptables du point de vue de la sûreté du stockage. Il est recommandé que le choix du site et la conception de l'installation de stockage soient tels que l'évolution du système de stockage puisse être déterminée sur une période de temps permettant une décroissance substantielle de l'activité des radionucléides présents dans l'inventaire des colis de déchets. En particulier, la stabilité du milieu géologique (qui englobe une évolution limitée et prévisible) devra être démontrée pour une période au moins égale à 10 000 ans.

- Hydrogéologie

L'hydrogéologie du site devra être caractérisée par une très faible perméabilité de la formation hôte et un faible gradient de charge hydraulique. Un faible gradient régional hydraulique sera par ailleurs recherché pour les formations environnantes de la roche hôte.

Des mesures hydrogéologiques devront être réalisées sur une zone beaucoup plus large que celle du site de façon à pouvoir bâtir des modèles d'écoulement prenant en compte les flux depuis les zones d'alimentation jusqu'aux exutoires. Ces modèles régionaux devront permettre de simuler la vitesse et la direction des circulations souterraines.

Il convient de repérer, caractériser et prendre en compte les discontinuités ou les hétérogénéités conductrices d'eau dont la nature et la géométrie pourraient localement amoindrir la capacité de la roche hôte à participer aux fonctions de sûreté.

- Respect d'une profondeur minimale

Le site devra être choisi de telle sorte que la profondeur retenue pour les ouvrages de stockage des déchets visés par la présente règle permette de garantir que la sûreté du stockage ne sera pas affectée de façon significative par les phénomènes d'érosion (notamment à la suite d'une glaciation), par l'effet d'un séisme, ou par les suites d'une intrusion humaine «banale».

L'épaisseur de la zone superficielle pouvant être ainsi perturbée est *a priori* de l'ordre de 200 mètres.

	<p>Guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde</p>	<p>Indice 0 Version du 12/02/2008</p>
--	---	---

- Absence de stérilisation de ressources souterraines extractibles

Le site devra être choisi de façon à éviter des zones pouvant présenter un intérêt exceptionnel en termes de ressources souterraines.

D'autres propriétés devront être examinées. Ainsi :

- le choix du site devra tenir compte des propriétés mécaniques et thermiques de la roche qui conditionnent la faisabilité du stockage, c'est-à-dire la possibilité de réaliser une installation de stockage dont les effets sur le milieu géologique sont compatibles, d'une part avec les objectifs de sûreté en exploitation et après la fermeture du stockage, d'autre part avec la réversibilité du stockage ;
- une description quantitative des propriétés géochimiques du système devra être établie pour l'analyse des conditions de migration des radionucléides. En effet, les propriétés géochimiques de la roche jouent un rôle important dans la sûreté du stockage après la fermeture de l'installation dans la mesure où, d'une part elles peuvent avoir un effet sur l'altération des colis et des composants ouvragés, d'autre part elles gouvernent les phénomènes de migration des radionucléides éventuellement relâchés.

Les différentes évaluations de sûreté réalisées en support du choix d'un site devront montrer que les propriétés du site retenu permettent le respect de l'objectif de protection de la santé des personnes et de l'environnement.

5.4. Les composants ouvragés

Avant sa fermeture, les vides subsistant dans l'installation de stockage, notamment dans les galeries et dans les alvéoles autour des colis mis en place, devront être réduits pour limiter l'endommagement de la roche hôte et rétablir autant que possible, après la fermeture de l'installation, la capacité de confinement de la roche hôte. Les dispositifs mis en place pour atteindre cet objectif constituent les composants ouvragés.

Les fonctions de sûreté auxquelles participent les composants ouvragés sont, d'une part de s'opposer aux circulations d'eau dans l'installation de stockage en empêchant que les ouvrages ne constituent des drains préférentiels, d'autre part de contribuer à confiner l'activité dans le système de stockage en limitant et en retardant la migration des radionucléides. Ils contribuent également à isoler les déchets des circulations d'eaux, notamment en prévenant une intrusion d'eau autre que celle contenue dans la porosité de la roche hôte.

Les fonctions, les performances et les caractéristiques des composants ouvragés devront être définies et justifiées en rapport avec celles des colis et de la roche hôte, car ils interviennent en complément de ces deux composants pour pallier d'éventuelles faiblesses.

Il faudra veiller à ce qu'aucun matériau constitutif des composants ouvragés n'engendre, par sa présence, des effets négatifs préjudiciables aux fonctions de sûreté auxquelles participent la roche hôte et les colis de déchets.

Pour ce qui concerne la conception des composants ouvragés, il faudra tenir compte des exigences associées :

- à l'évacuation de la chaleur et des gaz dégagés par les colis de déchets,
- à la réduction de l'intensité des contraintes mécaniques engendrées,
- au maintien de conditions physico-chimiques favorables à la limitation de la corrosion des conteneurs et de la migration des radionucléides.

	<p>Guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde</p>	<p>Indice 0 Version du 12/02/2008</p>
--	---	---

Les liaisons jour-fond et éventuellement certaines galeries et certains ouvrages de l'installation de stockage devront faire l'objet de scellements assurant une étanchéité de qualité spécifiée. Cette préoccupation doit être intégrée dès leur conception.

5.5. Le concept de stockage

L'implantation de l'installation de stockage dans la roche hôte devra se situer au sein d'un volume de roche exempt de grandes failles susceptibles de constituer des voies privilégiées de circulation hydraulique. Les modules de stockage devront être réalisés à distance des aquifères environnants et des structures où l'eau pourrait circuler, de manière à imposer un temps de migration suffisamment long des radionucléides entre les ouvrages de stockage et la biosphère et à assurer que cette migration s'effectue, pour l'essentiel, dans un volume de roche peu perturbé par la présence de l'installation de stockage.

La conception et l'implantation des liaisons jour-fond devront permettre de limiter la circulation des eaux en prenant en compte la nécessité de réaliser un scellement efficace.

La présence des colis de déchets, ainsi que des matériaux rapportés et de remblayage ne doit pas engendrer d'effets préjudiciables aux propriétés physico-chimiques des autres composants du système de stockage. A cet égard, lors des travaux de caractérisation des différents composants, la détermination des valeurs limites admissibles des températures et des déformations devra faire l'objet d'une attention particulière.

La conception du système de stockage devra tenir compte du devenir et de l'influence des volumes d'air présents ou de gaz produits au sein des ouvrages, notamment de l'air contenu dans le matériau de remplissage ainsi que des gaz (hydrogène notamment) produits par corrosion, radiolyse et effets des micro-organismes.

Les perturbations résultant du creusement des ouvrages de l'installation de stockage devront être réduites autant que possible. Plus précisément, le concept de stockage et les techniques de réalisation devront être adaptés au site et en particulier devront limiter au mieux l'étendue et les effets de l'endommagement du milieu géologique résultant de l'excavation.

Les dispositions suivantes paraissent également être favorables du point de vue de la sûreté après la fermeture de l'installation :

- un positionnement des liaisons jour-fond adapté aux caractéristiques géologiques et hydrogéologiques du site afin de contribuer à limiter la migration des radionucléides ;
- la sectorisation de l'installation de stockage en modules pouvant être facilement isolés les uns des autres de manière à minimiser les conséquences d'un court-circuit hydraulique d'une partie du système de stockage ;
- la réalisation d'alvéoles de stockage selon une architecture permettant de limiter la vitesse de circulation d'eau à proximité des colis, indépendamment du rôle que peuvent jouer les composants ouvrages pour limiter ces circulations ;
- la limitation à une valeur inférieure à 100°C de la température maximale atteinte à l'interface entre les colis et les ouvrages de stockage ;
- la limitation de la perturbation chimique des ouvrages de stockage.

L'opportunité de retenir ces dispositions pour la conception du système de stockage devra néanmoins être confirmée sur la base de l'analyse de leur compatibilité avec une exploitation sûre de l'installation et avec le respect des conditions de réversibilité.

5.6. Le programme de surveillance

Un programme de surveillance de l'installation doit être mis en œuvre pendant la construction des ouvrages de stockage et jusqu'à la fermeture de l'installation. Certaines dispositions de surveillance pourraient également être maintenues après la fermeture de l'installation. La nécessité de mettre en œuvre cette surveillance doit être prise en compte dès la conception du système de stockage.

Outre sa contribution à la sûreté de l'installation en phase d'exploitation, le programme de surveillance a pour objectif de suivre l'évolution de certains paramètres caractérisant l'état des composants de l'installation de stockage et du milieu géologique, ainsi que les principaux phénomènes responsables de cette évolution. Le programme de surveillance basé sur l'actualisation des connaissances scientifiques doit permettre de montrer que les phénomènes précités ont bien été anticipés et restent maîtrisés. Il apporte également les éléments nécessaires pour la gestion, l'exploitation et la réversibilité de l'installation.

Les moyens utilisés pour la surveillance ne doivent pas diminuer le niveau de sûreté du stockage.

6. DEMONSTRATION DE LA SURETE APRES FERMETURE DE L'INSTALLATION DE STOCKAGE

La démarche de sûreté est fondée sur un processus itératif d'évaluation de la sûreté du stockage après fermeture. Ce processus est réalisé périodiquement aux différentes phases de développement d'une installation de stockage, depuis sa conception jusqu'à sa fermeture. Ces évaluations conduisent à confirmer ou à réviser des dispositions fixées à l'étape précédente, en vue d'établir la démonstration de la sûreté du stockage.

L'approche itérative devra, à chaque étape, porter sur les trois aspects complémentaires suivants :

- la vérification du caractère favorable, pour la sûreté, des performances des composants du système de stockage censés participer aux fonctions de sûreté pris isolément (colis, composants ouvrages, roche hôte), puis, dans leur ensemble ;
- l'évaluation des perturbations apportées, dans le système de stockage, par les interactions entre ses différents composants et l'estimation des conséquences de ces perturbations sur la réalisation des fonctions de sûreté, compte tenu des dispositions préventives et palliatives retenues dans la conception du système pour minimiser les perturbations ou leurs effets ;
- la modélisation du comportement futur du système de stockage pour un jeu de scénarios représentatifs de la situation de référence et des situations altérées, ainsi que l'estimation des risques radiologiques et chimiques associés à chacun de ces scénarios.

6.1 Vérification du caractère favorable des performances des composants

Cette vérification a pour objectif de vérifier d'une part la conformité des différents composants aux objectifs et aux critères présentés au chapitre 4 de la présente règle et d'autre part, plus généralement, une application adaptée du principe de défense en profondeur.

Le rôle complémentaire des différents composants du système de stockage devra être apprécié en montrant qu'en cas de dysfonctionnement d'un nombre plausible de colis ou d'un nombre plausible de composants ouvrages de l'installation, ainsi qu'en cas d'altération des propriétés du milieu géologique, les relâchements d'activité restent limités.

Cette évaluation devra notamment s'appuyer sur une modélisation du système de stockage permettant notamment d'apprécier la contribution des différentes classes de composants du système de stockage (voir sous-chapitre 2.1) et du milieu géologique à la limitation des relâchements dans l'environnement de l'installation de stockage, pour les diverses situations envisageables. Des indicateurs autres que la

	<p>Guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde</p>	<p>Indice 0 Version du 12/02/2008</p>
--	---	---

dose peuvent être utilisés (flux ou concentration d'activité estimés pour diverses localisations dans l'installation). Des analyses de sensibilité doivent permettre de mieux identifier les composants et les phénomènes importants pour la sûreté afin d'orienter la recherche et le développement et de fonder les activités de qualification de ces composants.

6.2. Evaluation des perturbations induites dans le système de stockage

Cette évaluation consiste à étudier et modéliser les différents phénomènes et événements pouvant conduire à des perturbations des composants du système de stockage participant aux fonctions de sûreté. Les incertitudes associées devront être identifiées et prises en compte afin de montrer que les composants sont bien dimensionnés pour que les fonctions de sûreté restent assurées avec des marges suffisantes sur une durée appropriée.

Pour ce qui concerne le milieu géologique, les effets des perturbations liées au creusement des ouvrages de stockage et d'accès, ainsi que les effets couplés des perturbations thermiques, mécaniques, hydriques et chimiques qui l'affecteront seront étudiés. Les perturbations éventuelles du milieu géologique induites par la présence de gaz seront également considérées.

6.3. Evaluation des expositions individuelles

L'approche retenue pour vérifier le respect des objectifs définis au chapitre 3 consiste à étudier un nombre limité de situations représentatives des différentes familles d'événements, de séquences ou de combinaisons d'événements, pour lesquelles les conséquences associées sont les plus élevées parmi l'ensemble des situations envisageables. Cette approche repose sur une sélection d'événements considérés comme raisonnablement envisageables et représentatifs des risques.

Lors de l'étude des situations retenues, l'évaluation des expositions individuelles consiste à estimer, d'une part le comportement futur prévisible du système de stockage à partir de l'état initial du site tel que défini à l'issue du programme de reconnaissance, d'autre part les effets sur les personnes éventuellement induits par sa présence dans les différentes situations précisées dans le sous-chapitre 5.4 et dans l'annexe 2.

L'évaluation des expositions individuelles à long terme nécessite de disposer notamment des éléments suivants :

- l'ensemble des données décrivant le système de stockage (inventaire de l'activité stockée, caractéristiques des différents composants, architecture de l'installation de stockage...). Ces données doivent être soit des données pessimistes tendant à majorer l'estimation de l'impact radiologique, soit des données moyennes (ou probables) complétées par des fourchettes d'incertitudes et des estimations des variations possibles avec le temps ;
- les données de base telles que celles nécessaires à l'identification des espèces relâchées (spéciation) et à l'évaluation de leurs effets radiologiques sur l'homme ;
- la biosphère (cf. sous-chapitre 5.6) ;
- la liste et les caractéristiques des situations retenues ;
- les modèles de calcul.

La présentation des résultats devra permettre d'apprécier l'impact radiologique du stockage pour les différentes situations étudiées et les incertitudes associées.

	<p>Guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde</p>	<p>Indice 0 Version du 12/02/2008</p>
--	---	---

6.4. Situations prises en compte

La sélection des situations étudiées comporte les étapes suivantes :

- l'identification des événements susceptibles de survenir,
- le classement des événements en fonction de leur probabilité, de leur origine (l'installation de stockage, les activités humaines, les processus naturels),
- les situations résultant de ces événements ou de leur éventuelle combinaison,
- le tri des situations par familles,
- la sélection des situations représentatives.

Cette sélection conduit à distinguer la situation de référence représentative des événements probables et les situations altérées correspondant à l'occurrence d'événements incertains, mais plausibles.

Pour ce qui concerne la localisation dans le temps de ces situations, on se référera aux périodes suivantes :

- une période initiale caractérisée par une décroissance importante de l'activité des radionucléides à vie courte ou moyenne. La conservation supposée de la mémoire du stockage, pour laquelle des dispositions doivent être prises, permettra de rendre extrêmement peu probable l'intrusion humaine pendant cette période ;
- une période intermédiaire, au cours de laquelle la stabilité doit être démontrée. Elle est caractérisée par l'absence de glaciation majeure et l'établissement d'un environnement chimique réducteur au voisinage des ouvrages de stockage ;
- la période postérieure à la période précédente, pour laquelle l'occurrence de glaciations majeures est à retenir.

6.4.1. Situation de référence

Les événements à considérer sont :

- les événements liés à la présence de l'installation de stockage. L'impact de celle-ci se traduira par la mise en jeu de processus associés à l'émission de chaleur, à l'émission de gaz, à des modifications mécaniques, physico-chimiques ou encore à la désaturation du milieu naturel autour des ouvrages de stockage. L'ensemble des processus de dégradation progressive des colis et composants ouvrages (corrosion des conteneurs et des matrices de confinement, vieillissement des composants ouvrages...) devra être considéré ;
- un ensemble d'événements naturels très probables (cycles climatiques, « effet de serre » lié à l'activité humaine, activité sismique, subsidence ou surrection). Les cycles climatiques (géodynamique externe) s'accompagnent de processus tels que des cycles d'érosion/sédimentation et de modifications de l'hydrologie de surface et des circulations en profondeur.

6.4.2. Situations altérées

Les événements étudiés pour définir ces situations seront, soit des événements de même nature que ceux retenus pour établir la situation de référence, mais d'ampleur exceptionnelle, soit des événements très incertains quant à leur date d'occurrence et leur déroulement. Ces événements seront répartis en deux catégories, les événements naturels et ceux liés à l'activité humaine.

	<p>Guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde</p>	<p>Indice 0 Version du 12/02/2008</p>
--	---	---

Les événements naturels à considérer comprennent les changements climatiques d'amplitudes exceptionnelles, une activité sismique exceptionnelle, une subsidence ou une surrection exceptionnelles, le diapirisme, l'activité magmatique, la chute de météorites. Selon le site retenu, certains de ces événements pourront, après analyse justificative, ne pas être considérés.

Les événements liés à l'activité humaine comprennent les intrusions humaines directes ou indirectes (forages, mines, cavité, constructions de surface ou de sub-surface), les défauts de colis (aléas sur les conditions de dégradation, manque de respect de spécifications, spécifications inappropriées, défauts de fabrication), les défauts de composants ouvrages (défauts de fabrication ou de conception), les anomalies ou défauts non détectés dans le milieu géologique.

A titre indicatif, les situations à retenir pour l'analyse pourraient être celles qui figurent dans l'annexe 2.

6.5. Modélisation de l'évolution du système de stockage

L'analyse de la sûreté du stockage et l'évaluation de son impact sur l'homme et l'environnement nécessitent la modélisation des évolutions des composants du système de stockage et de la migration des substances radioactives et des substances chimiques relâchées par les colis de déchets. Cette modélisation doit s'appuyer sur une connaissance suffisante des processus physico-chimiques et des événements qui peuvent affecter l'évolution du système de stockage et de son environnement et donc sur des investigations, ainsi qu'un programme de recherche, adaptés.

L'évolution du système de stockage est déterminée par le comportement des différents sous-systèmes qui le constituent et qui sont interdépendants. A cet égard, il est habituel de distinguer les deux sous-systèmes suivants, très différents en termes de modélisation :

- le champ proche, qui comprend les colis, les composants ouvrages et la partie du milieu géologique susceptible de subir des transformations irréversibles du fait de l'existence de l'installation de stockage ;
- le champ lointain, qui est la partie du milieu géologique non directement affectée par la présence de l'installation de stockage.

Les modèles sont des représentations simplifiées des phénomènes réels. Il convient de montrer, d'une part que ces représentations ne laissent pas de côté des phénomènes importants, d'autre part que les simplifications effectuées conduisent à des évaluations majorantes.

Compte tenu de l'importance de la modélisation, un soin particulier devra être porté à la qualité des données utilisées (chapitre 6), ainsi qu'à l'examen de la validité des modèles conceptuels et des codes de calcul utilisés. Pour cela, il sera en particulier nécessaire de participer à des intercomparaisons de modèles et de les confronter à des résultats d'expérimentations.

Compte tenu du caractère itératif de la démonstration de sûreté, le niveau de détail de la modélisation dépendra également de l'avancement des études et du niveau de précision des données qui auront été collectées au moment de la modélisation.

6.6. Biosphère

La biosphère est constituée par la partie de l'environnement facilement accessible aux activités de l'homme. Elle est susceptible de permettre le transfert vers les personnes des radionucléides provenant de l'installation de stockage entraînant une exposition interne (inhalation, ingestion) ou une exposition externe.

Les voies de transfert vers et au sein de la biosphère peuvent comprendre :

- les aquifères utilisés par l'homme pour les ressources en eau ;

	<p>Guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde</p>	<p>Indice 0 Version du 12/02/2008</p>
--	---	---

- la zone d'exutoire des eaux souterraines susceptibles d'avoir traversé les ouvrages de stockage ;
- le système d'écoulement superficiel de ces eaux ;
- les sols susceptibles d'être irrigués ou inondés par ces eaux ;
- la production végétale ou animale susceptible d'être utilisée pour la consommation humaine et pouvant être contaminée ;
- l'atmosphère (transport et dépôt de poussières et de gaz).

Il n'apparaît pas possible de prévoir l'évolution locale de la biosphère sur de très longues périodes. En revanche, les grands événements climatiques régionaux prévisibles pourront être pris en compte en faisant appel à la notion de biosphères-types, représentatives des différents états que pourrait prendre à plus grande échelle la biosphère, compte tenu de ces événements.

Par ailleurs, pour le calcul de l'impact radiologique, on retiendra des groupes de référence hypothétiques, représentatifs des individus susceptibles d'être soumis aux expositions les plus élevées. Ces individus seront supposés vivre au moins partiellement en autarcie.

6.7 Prise en compte des incertitudes et études de sensibilité

La détermination et la prise en compte des incertitudes sont des éléments essentiels de l'analyse de sûreté.


Les principales sources d'incertitudes sont de différentes natures :

- incertitudes sur les valeurs des paramètres,
- incertitudes associées aux manques de connaissance sur certains phénomènes,
- incertitudes sur le caractère exhaustif ou non de la prise en compte des phénomènes pouvant avoir une influence,
- incertitudes inhérentes aux modèles conceptuels ou aux simplifications nécessaires pour établir des modèles,
- incertitudes relatives aux événements futurs ou aux activités futures de l'homme.

La démonstration de sûreté doit clairement identifier dans quelle mesure les investigations sur le site, les résultats des programmes de recherche, les dispositions de conception, les hypothèses prises pour l'évaluation et les études de sensibilité ont permis d'apprécier les incertitudes et d'en tenir compte. Les incertitudes résiduelles seront appréciées, suivant leur nature, de manière qualitative ou quantitative. Il pourra être fait appel à des jugements d'experts ; la traçabilité de ces jugements devra être établie.

L'évaluation des performances des composants, du comportement d'ensemble du système de stockage et des expositions individuelles devra être accompagnée d'éléments pertinents visant à démontrer le caractère pessimiste des résultats obtenus, ainsi que le bien-fondé des choix de conception. Des études de sensibilité devront par ailleurs être effectuées afin de mettre en évidence les paramètres les plus importants et de justifier les hypothèses simplificatrices adoptées.

Les analyses de sensibilité permettent d'identifier les points sur lesquels devrait porter en priorité l'effort de définition (situations prises en compte), de compréhension et de hiérarchisation des processus mis en jeu (modèles) ou de caractérisation (paramètres) pour accroître la crédibilité des résultats des évaluations.

	Guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde	Indice 0 Version du 12/02/2008
---	---	--------------------------------------

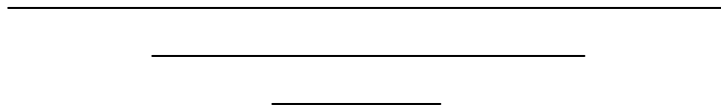
6. ASSURANCE DE LA QUALITE

L'ANDRA devra, par la mise en œuvre d'un ensemble contrôlé d'actions planifiées et systématiques, obtenir une qualité appropriée fondée sur des procédures écrites et archivées.

Les domaines concernés sont les suivants :

- la conception, la construction et l'exploitation de laboratoires souterrains,
- la conception d'un système de stockage et la qualification de ses différents composants,
- la surveillance de la production des colis de déchets,
- l'acquisition de données sur les sites et en laboratoire,
- la démonstration de sûreté et la modélisation qui lui est associée.

L'opérateur procède à la surveillance et au contrôle de l'action des prestataires qui interviennent dans ces différents domaines.



	Guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde	Indice 0 Version du 12/02/2008
--	---	--------------------------------------

ANNEXE 1

ORIENTATIONS RELATIVES AUX COLIS DE DECHETS ET AUX INVESTIGATIONS A MENER SUR LE SITE

A1 – 1 COLIS DE DECHETS

A1- 1.1 Connaissance des colis de déchets

Sans préjudice des éventuels compléments de colisage définis par l'ANDRA, la connaissance des colis de déchets nécessaire aux différents stades des études de conception de l'installation et d'évaluation de sûreté du stockage, sera établie et actualisée par les exploitants nucléaires, conformément à un besoin de connaissances défini par l'ANDRA. Ce besoin de connaissance sera justifié selon l'incidence des propriétés des colis dans les études de conception et de sûreté du stockage.

Un dossier de connaissances recueillant l'ensemble des caractéristiques des colis susceptibles d'influencer la sûreté du stockage devra être établi par famille de colis. Ces caractéristiques devront avoir été établies sur la base, d'une part d'essais de caractérisation, d'autre part de mesures ou d'évaluations réalisées sur les colis produits. Les essais de caractérisation seront effectués, selon les cas, sur des colis actifs ou inactifs ou sur des échantillons représentatifs du processus industriel de production. Les essais, mesures et évaluations ont pour but d'apporter les connaissances nécessaires à la conception et à la démonstration de sûreté. Il importe notamment :

- de déterminer les caractéristiques radioactives des colis de déchets et leur inventaire en radionucléides. En particulier, une bonne estimation de l'activité des radionucléides à période longue ainsi que de celle des radionucléides volatils doit être obtenue ;
- de connaître le contenu chimique des colis de déchets, notamment en complexants ou en produits susceptibles d'accroître la solubilité des radionucléides ou d'altérer la capacité des radionucléides à être retenus dans les autres composants du système de stockage ;
- de connaître la nature et les quantités des gaz produits du fait de phénomènes de radiolyse, de corrosion et d'altération des colis sous irradiation ou sous l'effet des micro-organismes ;
- d'évaluer les caractéristiques physiques des colis de déchets : densité, homogénéité, taux de remplissage, pourcentage d'eau incorporée, conductibilité et capacités thermiques, températures caractéristiques, caractéristiques mécaniques... ;
- de déterminer les propriétés des colis, notamment celles associées à leur capacité initiale de confinement et leur évolution dans des conditions représentatives du stockage, soit, selon les cas :
 - résistance à la lixiviation,
 - taux de dégazage,
 - tenue mécanique,
 - interactions chimiques (déchet/matrice, déchet ou matrice/matériaux des composants ouvragés...),
 - effets thermiques,
 - effets de l'irradiation alpha ou bêta-gamma,
 - effets des micro-organismes.

	<p>Guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde</p>	<p>Indice 0 Version du 12/02/2008</p>
--	---	---

Des études de comportement à long terme des colis en présence des différentes agressions susceptibles de les affecter (interactions notamment avec les matériaux des composants ouvragés et avec la roche, effets des rayonnements ou des micro-organismes) devront être effectuées en vue de déterminer, en particulier, leur taux de dégradation en fonction du temps, la nature des produits de dégradation et les interactions entre les produits de dégradation et les radionucléides à période longue contenus dans les colis (colloïdes, complexes...).

Des études devront être menées pour déterminer les formes chimiques stables des radionucléides relâchées par les colis dans les conditions de stockage.

A1-1.2 Acceptabilité des déchets en stockage

L'article L542-12 du code de l'environnement, modifié par la loi n° 2006-739 du 28 juin 2006, dispose que l'ANDRA est chargée de prévoir, dans le respect des règles de sûreté nucléaire, les spécifications pour le stockage des déchets radioactifs et de donner aux autorités administratives compétentes un avis sur les spécifications pour le conditionnement des déchets.

A cet égard, il conviendra que les propriétés des colis soient évaluées en regard des propriétés figurant dans la grille d'analyse suivante :

- les matériaux constitutifs des colis ne présentent pas de réactivité significative dans les différentes conditions d'environnement rencontrées dans l'installation de stockage lors de son exploitation et après sa fermeture. L'usage de matériaux dont la présence dans l'installation est susceptible d'être préjudiciable aux fonctions de sûreté auxquelles participent les colis et les autres composants du système de stockage devra être évité ou limité. L'éventuel dispositif de surcolisage devra être constitué de matériaux résistant à la corrosion dans les conditions de variabilité de l'environnement chimique du colis, telles qu'attendues durant la période de confinement visée. Les autres matériaux constitutifs du colis ne devront pas être préjudiciables au maintien de l'intégrité du dispositif de surcolisage. Il faudra notamment veiller à limiter la possibilité de réaction chimique entre les déchets et ce dispositif, ainsi qu'à éviter la possibilité de couplage galvanique entre les différents constituants métalliques du colis ;
- les colis doivent générer des quantités de gaz limitées, compatibles avec le maintien de leurs propriétés favorables pour la sûreté, ainsi que de celles des autres composants du système de stockage ;
- les substances réactives ou complexantes présentes dans les colis sont en quantité suffisamment faible pour que leur relâchement n'occasionne pas une solubilisation des radionucléides ou une altération de la capacité des radionucléides à être retenus par les composants ouvragés de l'installation de stockage et par la roche hôte dans des proportions qui seraient préjudiciables à la sûreté ;
- les caractéristiques thermiques des colis permettent d'éviter que l'effet de la chaleur dégagée n'altère leurs propriétés de confinement et soit préjudiciable aux fonctions des autres composants du système de stockage. Le dégagement de chaleur n'occasionne pas l'apparition de phénomènes trop complexes à appréhender et à modéliser lors de la démonstration de sûreté du stockage ;
- les propriétés mécaniques des colis permettent de garantir qu'aucune dégradation notable de leur capacité de confinement ne survient avant la fermeture de l'installation, du fait de la charge des empilements envisagés, et, le cas échéant, après la fermeture, pendant la période durant laquelle la dissémination des substances radioactives non gazeuses doit être évitée. Par ailleurs les volumes vides qui peuvent être présents dans les colis ne remettent pas en cause la sûreté du stockage ;

- les colis présentent des caractéristiques favorables à la prévention des risques de criticité de manière à ce que, quelles que soient la géométrie initiale d'empilement des colis et les configurations d'empilement envisageables dues à la dégradation des composants du système de stockage après la fermeture de l'installation, l'occurrence d'un accident de criticité demeure improbable et les conséquences liées à la dissémination de l'activité lors d'un tel accident, si celui-ci ne pouvait pas être définitivement écarté, ne soient pas inacceptables.

La recherche des propriétés présentées ci-dessus s'apparente à une bonne pratique qui doit être mise en œuvre dès lors que la fabrication industrielle de colis est envisagée. Toutefois, elle ne préjuge pas de l'acceptabilité future des colis ne répondant pas totalement aux caractéristiques recherchées. En effet, l'acceptation des colis dans l'installation de stockage sera délivrée au cas par cas, sur la base de l'analyse de sûreté.

A1-2 INVESTIGATIONS A MENER SUR UN SITE

A1-2.1 Etudes géologiques

A1-2.1.1 Phénomènes géologiques à long terme

Ces phénomènes devront être évalués de façon qualitative et quantitative en se reportant à la situation actuelle, au passé proche (historique) et surtout au passé plus ancien (quaternaire). Ceci permettra d'apprécier les valeurs des paramètres les caractérisant ainsi que leurs variations, et d'en examiner l'influence. A cette fin, il sera en règle générale nécessaire de considérer l'environnement géologique régional du site.

A1-2.1.2 Mesures hydrogéologiques

Des mesures hydrogéologiques devront être réalisées au niveau régional de façon à bâtir des modèles d'écoulement prenant en compte les flux depuis les zones d'alimentation jusqu'aux exutoires. Ces schémas régionaux devront permettre de modéliser la vitesse et la direction des circulations souterraines.

A1-2.1.3 Modélisations thermiques, hydriques et mécaniques

Des études devront être effectuées, notamment à l'aide d'une modélisation couplée des phénomènes thermiques et mécaniques, pour étudier l'influence des modalités et des séquences de mise en place des colis sur le comportement mécanique de l'installation de stockage, en tenant compte, en particulier, du temps de refroidissement préalable et de la densité du stockage. Ces études spécifiques devront permettre de déterminer les paramètres physiques correspondants et de préciser l'influence de ces phénomènes. A cet égard, lors des travaux de caractérisation des différents composants du système de stockage, la détermination des valeurs admissibles des températures et des déformations devra faire l'objet d'une attention particulière.

A1-2.1.4 Analyse des propriétés géochimiques

Une description quantitative des propriétés géochimiques du système devra être établie pour l'analyse des conditions de migration des radionucléides.

Des analyses minéralogiques des matériaux de la roche hôte devront être effectuées et la possibilité d'une évolution géochimique de ces matériaux en fonction notamment de la température et de l'irradiation sera examinée. On étudiera particulièrement le rôle des minéraux argileux.

A1-2.2 Investigations à mener en surface

A1-2.2.1 Objectifs

Les objectifs des investigations doivent être, pour chaque site de :

- déterminer en premier lieu ses caractéristiques lithologiques, structurales, pétrographiques, hydrogéologiques, thermomécaniques, géochimiques et tectoniques afin en particulier de porter une appréciation sur son aptitude à remplir les critères de choix de site (sous-chapitre 4.3) ;
- rassembler les éléments nécessaires à la modélisation du site en vue de la démonstration de sa sûreté.

Ces objectifs pourront être atteints de façon complémentaire par des investigations de surface, par des forages de reconnaissance et par l'étude des matériaux extraits de ces forages (eau, gaz et roche).

A1.2.2.2 Investigations depuis la surface

Les investigations depuis la surface devront notamment permettre :

- de confirmer la géométrie des formations géologiques du site et de son environnement par des études structurales et des investigations géophysiques ;
- de reconnaître les grandes failles éventuelles du milieu par des observations de surface, de la télédétection et de la géophysique ;
- d'affiner l'étude néotectonique locale ;
- de déterminer, par une étude hydrogéologique régionale, la nature, la position et les caractéristiques des exutoires possibles des eaux provenant de l'installation de stockage.

A1.2.2.3 Forages de reconnaissance

Les forages de reconnaissance auront notamment pour but de déterminer :

- les perméabilités et les porosités de la roche hôte et des formations encaissantes ; la reconnaissance portera sur la perméabilité globale de ces formations, ainsi que sur les écarts de perméabilité susceptibles d'être provoqués par d'éventuelles discontinuités sédimentaires ou structurales ;
- le rôle hydraulique des grandes failles, le cas échéant ;
- le champ des potentiels hydrauliques dans la roche hôte et des encaissants ;
- la distribution des températures naturelles dans la roche hôte.

De plus, dès les premiers accès à la roche hôte, il faudra s'efforcer d'évaluer en priorité ses caractéristiques mécaniques en place et son état de contrainte naturel, afin de disposer des données nécessaires à la prévision de son comportement hydro-thermomécanique.

La présence éventuelle de gaz dans les fluides de forage sera suivie avec attention, afin d'obtenir une première indication de la perméabilité de certains milieux fissurés et de caractériser les inclusions gazeuses éventuelles dans le sel.

Il faudra enfin réaliser des diagraphies pour permettre :

- de vérifier l'homogénéité ou de caractériser les hétérogénéités physiques ou lithologiques de la roche ;

- d'interpréter finement, par la mesure de différents paramètres physiques, les données géophysiques acquises depuis la surface, entre surface et forages, ou entre forages (densité, vitesses de propagation...).

A1-2.2.4 Étude des matériaux extraits des forages

Il sera nécessaire de caractériser les roches du milieu géologique à partir des échantillons prélevés sur les carottes de forage, du point de vue minéralogique, chimique, physique et mécanique. Une attention particulière sera portée aux paramètres mécaniques de l'argile et du sel. Pour l'ensemble des milieux, devront être mesurés dans le cadre du programme de reconnaissance :

- les paramètres mécaniques (résistance, déformabilité, viscosité) ;
- les paramètres thermiques (coefficients de conductibilité et de dilatation, chaleur spécifique) ;
- les porosités, les perméabilités et les coefficients de couplage thermo-poro-mécanique.

L'anisotropie de ces paramètres sera évaluée.

Il sera également nécessaire de caractériser les propriétés et la composition physique, chimique et isotopique des eaux interstitielles prélevées dans les différentes parties perméables ou peu perméables des aquifères. La composition de ces échantillons ne devra pas subir de perturbations impossibles à identifier induites par les travaux de forage : mélanges provoqués d'eaux naturellement distinctes, contamination par les fluides de forage. Le mode de foration et de prélèvement des échantillons fluides et solides devra être adapté de façon à minimiser les perturbations qu'ils pourraient subir.

Des expériences conduites sur échantillons permettront également, dès ce stade, de mettre en évidence certains effets couplés (thermiques, mécaniques et hydrauliques) et d'évaluer les coefficients d'échange entre les fluides et les phases minérales du système.

Il faudra accorder une attention particulière à l'analyse des hétérogénéités physiques et chimiques du milieu aux différentes échelles, notamment de la fracturation (densité, orientation et remplissage des fractures) et des variations de faciès.

A1-2.3 Investigations à mener dans un laboratoire souterrain

A1-2.3.1 Objectifs des investigations

Les objectifs des investigations en laboratoire souterrain devront notamment être :

- d'effectuer des mesures sur les roches en place ou sur des fluides aussi peu perturbés que possible par les conditions de l'expérience, afin d'améliorer la connaissance des paramètres déjà évalués en partie lors du programme de reconnaissance mené à partir de la surface ;
- de permettre de déterminer, par des expériences à caractère plus global, le comportement des différentes roches et des fluides, en prenant en compte les phénomènes naturels et les modifications provoquées par la réalisation de la future installation de stockage ;
- de qualifier les méthodes à utiliser pour le creusement, le rebouchage et le scellement des cavités et ouvrages ;
- de montrer la faisabilité industrielle de mise en place des composants ouvragés par des démonstrateurs ;
- de contribuer à montrer la faisabilité de reprise des colis en dépit de l'éventuelle corrosion des conteneurs et des effets thermo-hydro-mécaniques.

	<p>Guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde</p>	<p>Indice 0 Version du 12/02/2008</p>
--	---	---

A1-2.3.2 Mesures in situ et sur échantillons

Des mesures devront être effectuées au sein du laboratoire, pour confirmer ou préciser les valeurs des paramètres et pour apprécier leur anisotropie, leur distribution spatiale, ainsi que les effets d'échelle.

Parmi les investigations à mener, il conviendra :

- d'évaluer la perméabilité en grand de la roche hôte, à l'eau et aux gaz ;
- de préciser, notamment par des mesures à partir du fond, le rôle hydraulique des failles ou fractures éventuellement rencontrées ;
- de déterminer et suivre dans le temps les propriétés géochimiques des eaux et des gaz rencontrés au cours de la foration des galeries et des sondages depuis le fond, dans le but de préciser les connexions des zones plus ou moins perméables traversées ;
- d'évaluer le tenseur des contraintes initiales ;
- d'apprécier à partir des cavités creusées dans le laboratoire souterrain l'aptitude au forage de la roche, ainsi que le comportement des parois (risque d'écaillage pour les roches dures, convergence pour les roches plastiques) ;
- de mesurer les effets mécaniques différés (relaxation, fluage) ;
- de préciser les propriétés géochimiques pouvant influencer sur la migration des radionucléides et notamment de déterminer des coefficients d'échange eau-roche mesurés sur des carottes,
- d'étudier les propriétés du milieu géologique affecté par l'excavation.

L'étude de la petite fracturation sera réalisée.

A1-2.4 Mise en place d'une instrumentation de mesure pour le suivi de l'évolution du site pendant les phases d'exploitation et de réversibilité de l'installation de stockage

Compte tenu de la durée de la période d'exploitation et des perturbations induites durant cette période, il apparaît indispensable de prévoir une instrumentation adaptée pour le suivi de l'évolution des paramètres relatifs au site et aux ouvrages. Cette instrumentation devra être mise en place dès que possible, de façon à assurer un suivi des ouvrages et du site, non seulement pendant, mais aussi avant la période d'exploitation du stockage.

Il conviendra de suivre notamment :

- la piézométrie du site,
- les mouvements et, plus généralement, le comportement dans le temps des parois des ouvrages qui doivent rester ouverts très longtemps (certains forages de reconnaissance, puits d'accès, galeries de desserte),
- les mouvements sismiques,
- l'évolution thermique de la roche hôte et ses effets (contraintes, déplacements, fracturation...)
- l'évolution hydrique de la roche hôte.

A1-3 RECOMMANDATIONS PARTICULIÈRES RELATIVES AUX DIFFÉRENTS TYPES DE SITES

A1-3.1 Sites cristallins

Pour déterminer les caractéristiques géodynamiques majeures de chacun des massifs, devront être étudiés :

- l'histoire géologique post-paléozoïque du massif,
- le contexte géodynamique récent (pliocène et quaternaire),
- le contexte géodynamique actuel.

Pour l'évaluation du contexte géodynamique de chacun des massifs, devront être établis :

- une description et un repérage aussi précis que possible des accidents géologiques susceptibles de rejouer,
- une estimation des facteurs géodynamiques prépondérants,
- une évaluation de l'impact des mouvements attendus sur l'hydrogéologie et sur les installations de stockage,
- un schéma d'évolution géodynamique du massif tenant compte des phénomènes prépondérants ; ce schéma devra notamment permettre de définir les situations à retenir dans les évaluations des expositions individuelles, en particulier pour ce qui concerne le comportement hydrogéologique de la roche hôte.

Une interprétation détaillée des résultats du bilan hydrologique à l'échelle de chaque bassin versant devra être effectuée en vue d'avoir une estimation de l'alimentation de l'aquifère superficiel.

A1-3.1.1 Recommandations spécifiques aux sites granitiques

Les éléments suivants devront être définis aussi précisément que possible :

- le contexte géologique et structural de la zone de recherche,
- l'architecture du massif granitique (analyse structurale, analyse pétrologique),
- la cartographie détaillée du massif, en particulier, pour ce qui est des formations superficielles et de la fracturation,
- les contacts entre la roche hôte et les formations adjacentes,
- le contexte tectonique de la zone de recherche (analyse cinématique des différents types d'accidents, analyse microstructurale).

Pour l'hydrogéologie profonde, les éléments relatifs à la fracturation aux différentes échelles (petite fracturation, fracturation hectométrique, grandes failles en bordure de la roche hôte) et tous autres éléments nécessaires pour la modélisation devront être étudiés en vue notamment d'évaluer les temps de transferts de l'eau et d'identifier les exutoires.

A1.3.1.2 Recommandations spécifiques aux sites schisteux

Les éléments suivants devront être définis aussi précisément que possible, au plan local :

- la lithostratigraphie de la formation schisteuse,

	<p>Guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde</p>	<p>Indice 0 Version du 12/02/2008</p>
--	---	---

- sa cartographie, en particulier pour les niveaux gréso-quartzitiques s'ils existent,
- la cartographie détaillée des formations récentes,
- la caractérisation de la schistosité : type, répartition, rattachement à une seule phase, modifications au voisinage des failles,
- la fracturation aux différentes échelles ainsi que sa cartographie.

Ces éléments devront être complétés par une évaluation du cadre géologique général.

Pour l'hydrogéologie profonde, les éléments relatifs au comportement hydraulique des différents types de discontinuités (fracturation aux différentes échelles, filons, niveaux gréso-quartzitiques, schistosité) et tous autres éléments nécessaires pour la modélisation devront faire l'objet d'études en vue notamment d'évaluer les temps de transferts de l'eau et d'identifier les exutoires.

A1-3.2 Sites en formation salifère

Une synthèse des données disponibles les plus récentes sur la tectonique profonde devra être effectuée. Cette synthèse devra permettre, d'une part de préciser la géométrie des formations sous-jacentes au niveau régional (notamment les seuils et les bordures), d'examiner la présence d'évaporites sous-jacentes et d'établir la position et la continuité des accidents profonds, d'autre part d'évaluer leur influence sur la stabilité du site.

Les éléments suivants devront être définis aussi précisément que possible, au plan local :

- les principaux ensembles et sous-ensembles lithostratigraphiques de la série salifère (sel primaire, sel secondaire, poches de saumure, carbonates, argiles, sulfates, matériaux détritiques) ainsi que les discontinuités sédimentologiques ou de type brèches de dissolution. Dans toute la mesure du possible, les mécanismes de dépôt, les remaniements et les événements synsédimentaires ou diagénétiques survenus, ainsi que leur répartition dans l'espace et les niveaux repères chronostratigraphiques devront être mis en évidence ;
- la formation suprasalifère (niveaux marneux, à sulfates, anhydrite, gypse, brèches de dissolution) ;
- les limites supérieure, inférieure et latérale de l'ensemble salifère, au contact de sa couverture et de son substratum (phénomènes de dissolution, remaniements) ;
- la géométrie du socle compris au sens de substratum de la série salifère, en particulier pour ce qui est des accidents l'affectant ; la répercussion et l'expression de ces accidents sous-jacents dans la série évaporitique devront être appréhendées.

Pour l'hydrogéologie superficielle et latérale, une interprétation détaillée des résultats du bilan hydrologique à l'échelle de chaque bassin versant devra être effectuée en vue d'avoir une estimation de l'alimentation des aquifères superficiels.

Pour l'ensemble des aquifères, une étude hydrogéologique régionale mettant en évidence les zones d'alimentation, les discontinuités éventuelles, les exutoires et les relations entre les aquifères, ainsi qu'un bilan hydrogéologique devront être effectués.

Une étude hydrogéologique locale devra être effectuée. Elle devra mettre en évidence, d'une part les caractéristiques géométriques des aquifères (nature lithostratigraphique, morphologie, continuité...) et des niveaux imperméables, d'autre part leurs caractéristiques hydrodynamiques (perméabilité, transmissivité, porosité...) en tenant compte notamment de l'influence de la fracturation des terrains et de tous les autres éléments nécessaires pour quantifier les flux (par exemple les pompes locales).

Ces études hydrogéologiques devront permettre d'appréhender les risques de dissolution du sel.

	<p>Guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde</p>	<p>Indice 0 Version du 12/02/2008</p>
--	---	---

Les éléments suivants devront être étudiés :

- les différents facteurs à l'origine des mouvements d'ensemble verticaux actuels et leurs effets combinés,
- les conséquences des mouvements définis (modifications éventuelles de l'hydrographie et de l'hydrogéologie) et leur quantification (vitesses d'érosion, de transport, de sédimentation),
- le contexte sismotectonique régional.

Les objets structuraux ayant été actifs durant le plioquaternaire devront être définis aussi précisément que possible.

Les études précédentes seront fondées sur l'histoire sédimentologique et paléogéographique du plioquaternaire, appuyée sur une échelle chronostratigraphique détaillée.

A1-3.3 Sites en formation argileuse

La nature et l'importance des hétérogénéités à l'intérieur de la roche hôte devront être déterminées localement (sur le plan hydrogéologique et sur le plan géotechnique).

Les discontinuités verticales (flexures et failles) et horizontales (biseaux sédimentaires, discordances, changements de faciès) pouvant notamment jouer un rôle éventuel dans l'hydrogéologie locale devront être localisées et identifiées.

Ces travaux devront notamment inclure une interprétation des données géologiques locales en termes de sédimentologie régionale (reconstitution paléogéographique locale) de façon à déterminer les moteurs (directions et nature) ayant agi durant la sédimentation.

Une description de l'hydrogéologie superficielle devra être effectuée à l'échelle locale en vue d'avoir une estimation de l'alimentation des aquifères superficiels.

Les éléments suivants devront être déterminés pour l'ensemble des formations, aussi précisément que possible :

- un schéma hydrogéologique régional mettant en évidence les zones de mise en charge et les zones de décharge et les relations entre aquifères, ainsi qu'un bilan hydrogéologique préliminaire,
- un schéma hydrogéologique local mettant en évidence :
 - les caractéristiques géométriques des aquifères (nature lithostratigraphique, morphologie, continuité...) et des niveaux semi-perméables et imperméables,
 - leurs caractéristiques hydrodynamiques (porosité, perméabilité, transmissivité...) aussi bien verticales qu'horizontales en tenant compte notamment de la fracturation des terrains et de tous les autres éléments nécessaires pour quantifier les flux,
 - leurs caractéristiques géochimiques, notamment leur salinité,
 - les caractéristiques hydrodynamiques et la géométrie d'éventuelles discontinuités verticales pouvant mettre en relation différents niveaux stratigraphiques.

Au plan de la géodynamique à l'échelle régionale et locale, devront être effectuées :

- une synthèse des données sismotectoniques à l'échelle régionale,
- une reconnaissance des objets structuraux qui ont pu jouer un rôle dans les déformations récentes locales.

	<p>Guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde</p>	<p>Indice 0 Version du 12/02/2008</p>
--	---	---

ANNEXE 2

SELECTION DE SITUATION A ETUDIER DANS LE CADRE DE L'ANALYSE DE SURETE

A2-1. SITUATION DE REFERENCE

A2-1.1. Evolution du système due à la présence de l'installation de stockage

Les effets des travaux de creusement des cavités de stockage sur les propriétés hydrauliques de la roche et l'influence des conditions physico-chimiques transitoires autour des ouvrages sur le comportement hydraulique du système seront appréciés.

En ce qui concerne le dégagement thermique des déchets exothermiques, il faudra évaluer :

- les déformations et les contraintes induites par les effets thermomécaniques sur la roche hôte ;
- leurs conséquences sur les écoulements et la migration des radionucléides, en prenant en compte les particularités des milieux (fracturation du granite, hétérogénéités sédimentaires pour l'argile) ;
- les effets de thermoconvection éventuels ;
- les conséquences de l'ensemble des effets ci-dessus sur les formations sus-jacentes ;
- l'importance des phénomènes de déshydratation des minéraux argileux en fonction de la température et de la distance aux ouvrages de stockage.

A2-1.2. Evolution du système dues aux événements naturels

L'évolution retenue pour la situation de référence correspond à celle due aux événements naturels probables.

A2-1.2.1. Cycles climatiques

La succession de cycles climatiques tels que prévus par la théorie de Milankovitch sera envisagée, l'ensemble du site se trouvant en contexte périglaciaire. L'influence de la présence d'un pergélisol ou de la baisse du niveau des mers (de l'ordre de 100 m) sur l'érosion et ses conséquences éventuelles sur les écoulements d'eau en profondeur seront évaluées. Les effets des changements climatiques liés à l'activité humaine de type « effet de serre », ayant notamment pour conséquence une remontée du niveau des mers, seront pris en considération (période interglaciaire).

A2-1.2.2. Mouvements verticaux

L'amplitude des mouvements verticaux (subsidence, surrection) et les mécanismes associés seront évalués sur la base des observations réalisées sur le site. Les effets défavorables envisageables sur les écoulements souterrains seront appréciés.

A2-1.2.3. Activité sismique

Concernant l'activité sismique, un niveau d'activité sismique susceptible d'être rencontré au cours des diverses périodes étudiées sera retenu. Des incertitudes existent sur les niveaux sismiques possibles sur des périodes sensiblement supérieures à la période historique. Pour en tenir compte, plusieurs approches, éventuellement croisées, pourront être retenues en relation avec le contexte

	<p>Guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde</p>	<p>Indice 0 Version du 12/02/2008</p>
--	---	---

sismotectonique. Le degré de perturbation engendrée par l'activité sismique sur le système hydrogéologique devra être évalué aux échelles de temps et d'espace pertinentes.

A2-2. SITUATIONS DITES ALTEREES

Les événements à considérer seront répartis en deux catégories, les événements naturels et ceux liés à l'activité humaine.

A2-2.1. Situations altérées liées à des événements naturels

A2-2.1.1. Cycles climatiques d'amplitudes exceptionnelles

Des amplitudes exceptionnelles devront être prises en considération pour les cycles climatiques susceptibles de se produire tant que l'activité contenue dans le système de stockage n'a pas significativement décliné.

A2-2.1.2. Mouvements verticaux exceptionnels

Les valeurs de ces mouvements seront évaluées à partir de données correspondant à des périodes d'activité paroxystique observées au cours du plioquaternaire.

A2-2.1.3. Activité sismique exceptionnelle

Les caractéristiques du séisme maximal physiquement possible seront recherchées sur la base du contexte tectonique du site.

A2-2.2. Situations altérées liées à l'activité humaine

A2-2.2.1. Intrusion humaine

Pour ce type de situation, il faut fixer une date avant laquelle aucune intrusion humaine involontaire ne peut se produire en raison du maintien de la mémoire de l'existence du stockage. Cette mémoire dépend de la pérennité des mesures qui peuvent être mises en œuvre lors de l'archivage, des documents institutionnels résultant de la réglementation... Dans ces conditions, la perte de mémoire de l'existence du stockage peut être raisonnablement située au-delà de 500 ans. Cette valeur de 500 ans sera retenue comme date minimale d'occurrence d'une intrusion humaine.

La définition des caractéristiques des situations d'intrusion humaine retenues est fondée sur les hypothèses pessimistes suivantes :

- l'existence du stockage et son emplacement sont oubliés,
- le niveau de technologie est le même qu'aujourd'hui.

Forage exploratoire traversant un ouvrage de stockage

Une situation supposant un forage traversant le stockage avec extraction de carottes devra être retenue. L'exploitation de carottes constituées de déchets de haute activité donne lieu à une exposition externe qui sera évaluée en fonction du type d'examen effectué sur ces carottes.

Exploitation d'une mine

- Pour les sites cristallins, la situation est exclue du fait de l'absence d'intérêt minier des sites étudiés.
- Pour les sites argileux, l'exploitation d'une mine n'est pas à retenir compte tenu de l'absence d'intérêt minier particulier pour les formations existantes aux profondeurs envisagées pour les

ouvrages de stockage.

- Pour les sites salifères, l'exposition des travailleurs lors de l'exploitation d'une mine atteignant le dépôt sera évaluée.

Forage exploratoire abandonné et mal scellé traversant un ouvrage de stockage

- Pour les sites cristallins, il faudra étudier les conséquences liées aux modifications des écoulements et des temps de migration des radionucléides.
- Pour les sites sédimentaires, il faudra étudier les conséquences liées à la mise en communication d'aquifères ou entre un aquifère et les ouvrages de stockage.

Forage d'exploitation d'eau à usage alimentaire ou agricole dans un aquifère profond

Le caractère plausible d'un pompage d'exploitation d'eau à usage alimentaire ou agricole dans un aquifère profond sera précisé en fonction des ressources en eau. L'influence du pompage sur les écoulements sera appréciée en vue de l'évaluation des expositions individuelles.

Géothermie et stockage de chaleur

Cette situation n'est pas à étudier car les sites retenus ne devront pas présenter d'intérêt particulier de ce point de vue.

Autres situations d'intrusion envisageables pour les sites salifères

Création par dissolution d'une cavité interceptant le stockage

La saumure extraite de la cavité sera supposée être destinée à fournir du sel pour l'alimentation humaine. Les expositions individuelles dues à l'ingestion seront évaluées.

Pour cette évaluation, on prendra notamment en considération le mode d'exploitation du sel, la géométrie de la cavité, l'architecture du stockage, les caractéristiques des déchets, l'état des colis au moment de l'intrusion, le taux et la nature des insolubles contenus dans la formation salifère.

A titre de variantes, seront également examinées :

- la création d'une cavité par dissolution et l'utilisation du sel à des fins autres qu'alimentaires,
- l'exploitation du sel par doublet à des fins alimentaires.

Cavité lessivée ayant intercepté le stockage et abandonnée

La poche de saumure résultant du lessivage d'une cavité et subsistant à l'issue de l'exploitation peut être mise en communication avec l'aquifère supérieur du fait d'un mauvais scellement du puits d'exploitation. L'eau de cet aquifère après pompage peut servir à l'alimentation humaine ou à des fins agricoles. Les expositions individuelles seront évaluées en prenant en compte les voies de transfert par ingestion d'eau de boisson et consommation de produits agricoles issus de cultures arrosées avec cette eau.

A titre de variantes, seront examinées :

- la mise en communication d'aquifères supérieurs avec le stockage après l'abandon d'une exploitation du sel par doublet,
- La mise en communication avec les aquifères supérieurs d'une mine à proximité du stockage par les puits d'exploitation de la mine mal scellés après la fin de l'exploitation.

	<p>Guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde</p>	<p>Indice 0 Version du 12/02/2008</p>
--	---	---

A2-2.2.2. Défaut d'un composant

Par défaut d'un composant, il faut comprendre sa défaillance à exercer la ou les fonction(s) qui lui est (sont) attribuée(s) dans la situation de référence.

Milieu géologique

La présence d'un défaut est un aléa lié à un manque de connaissance du site, compte tenu des moyens d'investigation employés :

- *sites cristallins* : on envisagera une zone de fracture conductrice dans une zone proche de l'installation de stockage et non détectée compte tenu des moyens mis en œuvre ;
- *sites argileux* : lorsque les conditions de sédimentation permettent la formation de lentilles de sable, on envisagera la présence de telles lentilles non détectées, qui peut augmenter sensiblement la perméabilité.

Composants ouvragés

La défaillance d'un composant ouvragé peut avoir pour origine un défaut de conception du scellement d'un puits d'accès ou d'une galerie, ou le manque de respect de spécifications relatives aux matériaux ou à leur mise en place.

On étudiera les conséquences de ces défaillances.

Pour les sites sédimentaires, on prendra en compte les processus permettant la cicatrisation du milieu.

Colis de déchets

L'existence de défauts de conditionnement de colis pourra être considérée afin de tenir compte des diverses incertitudes sur la qualité et le vieillissement des colis.