



ONDRAF

Organisme national des déchets radioactifs
et des matières fissiles enrichies

Aperçu technique du rapport SAFIR 2

Safety Assessment and Feasibility Interim Report 2

Aperçu technique du rapport SAFIR 2

Safety Assessment and Feasibility Interim Report 2

Aperçu technique du rapport SAFIR 2

Errata (mars 2002)

- Page 16* Figure 2.4 : Le champ proche comprend aussi la zone perturbée par l'excavation, comme indiqué dans le cadre en regard.
- Page 63* Dernier paragraphe, ligne 2 : remplacer « résulte » par « pourrait résulter ».
- Page 88* Remplacer la dernière phrase avant la section 3.3.2.2 par « Les hypothèses de calcul du revêtement en section courante sont $P_v = 3$ MPa et $P_h = 2.7$ MPa, ainsi qu'une augmentation de température de 8°C, qui correspond à la charge thermique attendue sur la galerie de liaison en raison de l'expérience de démonstration PRACLAY ».
- Page 123* 1^{er} paragraphe, ligne 6 : remplacer « D_{app} » par « D_p ».
- Page 134* 2^e paragraphe, dernière phrase : remplacer « coefficient de diffusion » par « flux diffusif ».
- Page 138* Dernier paragraphe, ligne 6 : remplacer « carbonates » par « bicarbonates ».
- Page 168* 3^e paragraphe, ligne 10 : ajouter après 4 160 tU « (2 180 tUO₂ avec un taux de combustion de 45 GWj.tHM⁻¹ et 1 980 tUO₂ avec un taux de combustion de 55 GWj.tHM⁻¹) ».
- Page 173* Figure 4.11 : dans la légende, supprimer « Cl-36 », « Nb-94 » et « Sm-147 » et les carrés correspondants ; remplacer « Pd-107 » par « Cl-36 » et « Cs-135 » par « Pd-107 » ; sur le graphe, l'axe des ordonnées va de 1E+2 à 1E+8 et non de 1E+0 à 1E+6.
- Page 174* Figure 4.12 gauche : dans la légende, supprimer « U-234 » et le carré correspondant ; remplacer « U-238 » par « Ra-226 », « Th-230 » par « U-234 ; U-238 », « Ra-226 » par « Th-230 » et « Th-229 » par « Th-232 ».
- Page 174* Figure 4.12 droite : dans la légende, supprimer « Pu-244 » et « U-235 » et les carrés correspondants ; remplacer « U-236 » par « Th-232 », « Th-229 » par « U-236 » et « Pa-231 » par « U-235 ».
- Page 174* Figure 4.12 : dans la légende générale, remplacer « à gauche » par « à droite » et « à droite » par « à gauche ».
- Page 177* Figure 4.16 : dans la légende, permuter « U-236 » et « U-235 ».
- Page 178* Figure 4.17 : dans la légende, supprimer « Nb-94 » et « Sm-147 » et les carrés correspondants ; sur le graphe, supprimer la courbe du « Sm-147 ».
- Page 179* Figure 4.20 : dans la légende, remplacer « Th-229 » par « Th-230 ».
- Page 237* Supprimer « (Projet européen) » dans la définition de l'acronyme SAFIR.

Ce document a été rédigé en français par Brigitte Cornélis, rédactrice scientifique indépendante, à l'exception de quelques parties qui ont été rédigées avec l'aide directe de collaborateurs du programme de mise en dépôt profond des déchets des catégories B et C de l'ONDRAF : les sections 3.2 (Laurent Wouters, Wim Cool et Philippe Lalieux), 3.4.1 (Robert Gens), 3.5 (Robert Gens et Philippe Lalieux) et 3.8 (Laurent Wouters et Philippe Lalieux), ainsi qu'une partie de la section 3.6 (Philippe Lalieux et Robert Gens) et une partie du chapitre 6 (Philippe Lalieux et Peter De Preter).

Sa relecture a été confiée aux personnes suivantes :

- pour le CEN•SCK, département Déchets et évacuation : Jan Marivoet et Isabelle Wemaere ;
- pour le GIE EURIDICE : Frédéric Bernier ;
- pour l'ONDRAF : Johan Bel, Emiel Biesemans, Jean-Paul Boyazis, Wim Cool, Christian Cosemans, Freddy Decamps, Peter De Preter, Anne De Smedt, Ann Dierckx, Ludovic Froment, Robert Gens, Evelyn Hoof, Philippe Lalieux, Joris Lenssens, Pierre Manfroy, Jeroen Mertens, Jean-Paul Minon et Laurent Wouters.

Enfin, l'ensemble de la coordination a été assuré par Peter De Preter, Philippe Lalieux et Wim Cool.

Crédits des illustrations La plus grande partie des illustrations provient directement des travaux de l'ONDRAF et de ses partenaires directs, le CEN•SCK et le GIE EURIDICE. Les figures 3.32, 3.33 et 3.36 ont été réalisées d'après, respectivement, L. Bourcier, ANL-94/17, 1994, B. Grambow et al., EUR 19140 EN, 2000 et W. Hummel, NEA/OECD, 1995.

Dessin des illustrations Bailleul Ontwerpbureau

Impression Euroset

Ce document, dont la version originale a été rédigée en français, est également disponible en néerlandais sous le titre *Technisch overzicht van het SAFIR 2-rapport* (NIROND 2001–05 N) et en anglais sous le titre *Technical overview of the SAFIR 2 report* (NIROND 2001–05 E).

Toute reproduction de tout ou partie du présent document est autorisée moyennant mention de la source.

Avant-propos et remerciements

Ce document constitue l'aperçu technique du rapport SAFIR 2, qui synthétise l'ensemble des acquis techniques et scientifiques disponibles à l'issue de la deuxième phase (1990–2000) du programme de recherche et développement méthodologique consacré par l'ONDRAF à la mise en dépôt final des déchets radioactifs des catégories B et C au sein d'une formation argileuse peu indurée. Le rapport SAFIR 2 sera présenté par l'ONDRAF début 2002 à son Ministre de tutelle, après approbation de sa publication par son Conseil d'administration, afin de lui permettre de prendre connaissance des progrès réalisés quant à la faisabilité technique et à l'évaluation de la sûreté radiologique à long terme de cette solution.

Cet aperçu technique intègre les multiples aspects du programme belge de façon aussi complète que possible, en mettant l'accent sur ses éléments clés et sur les arguments qualitatifs qui sous-tendent les évaluations de la sûreté radiologique à long terme et de la faisabilité de la solution étudiée. Sa structure a toutefois été adaptée par rapport à celle du rapport SAFIR 2, disponible en version intégrale sur le CD-ROM joint, en vue d'une lecture plus aisée. Pour cette même raison, il omet le plus souvent de mentionner les sous-traitants de l'ONDRAF, à l'exception du Centre d'étude de l'énergie nucléaire (CEN·SCK) à Mol, le principal partenaire de l'ONDRAF en matière de recherche et développement.

L'ONDRAF tient néanmoins à remercier ici, sans pouvoir les citer individuellement tellement ils sont nombreux, tous ses partenaires et sous-traitants, belges et étrangers, pour leur collaboration à son programme de travail en matière de dépôt final des déchets des catégories B et C : le CEN·SCK, différentes universités, des bureaux d'études, d'autres agences de gestion des déchets radioactifs, des entreprises privées et des services publics. Il remercie également tout particulièrement la Commission européenne pour le soutien financier qu'elle lui apporte depuis toujours par le biais de ses programmes de recherche et développement. Il ne saurait par ailleurs suffisamment souligner l'apport essentiel des différents forums internationaux (AIEA, AEN, etc.) auxquels il participe : ces plates-formes de réflexion et de comparaison réunissant des experts de nombreux pays constituent en effet un outil majeur d'amélioration continue de la qualité de ses propres travaux. L'ONDRAF remercie les membres du comité d'experts belges créé à l'initiative de son Conseil d'administration afin d'accompagner la finalisation du rapport SAFIR 2 et d'émettre des recommandations pour la suite de son programme de travail. Enfin l'ONDRAF voudrait remercier Brigitte Cornélis pour l'effort de synthèse consenti pour la rédaction du présent document.

Table des matières

Chapitre 1	Introduction	1
1.1	La première phase de R&D méthodologique et le rapport SAFIR (1974–1989)	3
1.2	La deuxième phase de R&D méthodologique et le rapport SAFIR 2 (1990–2000)	4
1.3	L’aperçu technique du rapport SAFIR 2	7
Chapitre 2	Assurer la sûreté et la faisabilité : les principes directeurs du développement d’un dépôt final en profondeur	9
2.1	Les objectifs d’un dépôt final en profondeur	13
2.2	Les exigences générales	14
2.2.1	La sûreté radiologique à long terme	15
2.2.2	La robustesse	20
2.2.3	La sûreté opérationnelle	21
2.2.4	La sous-criticité et le respect des <i>safeguards</i>	21
2.2.5	La protection de l’environnement	22
2.2.6	La flexibilité	22
2.2.7	La faisabilité	23
2.2.8	La récupérabilité	23
2.3	Les exigences spécifiques à l’Argile de Boom	24
2.4	La gestion et l’assurance de la qualité	25
Chapitre 3	Générer et organiser les connaissances : les acquis scientifiques et techniques	27
3.1	Les déchets conditionnés	30
3.1.1	La classification des déchets radioactifs conditionnés	30
3.1.2	L’inventaire des déchets conditionnés destinés au dépôt en profondeur	34
3.1.3	Les règles générales et les critères d’acceptation	36
3.2	La formation-hôte et l’environnement du système de dépôt	38
3.2.1	La sélection et le statut des formations-hôtes étudiées en Belgique	39
3.2.2	L’Argile de Boom comme formation-hôte	41
3.2.2.1	Caractérisation stratigraphique et lithologique	42
3.2.2.2	Caractérisation tectonique et sismique	50
3.2.2.3	Interprétation intégrée	52

3.2.3	L'hydrogéologie de l'Argile de Boom et de son environnement	52
3.2.3.1	Définition des unités hydrogéologiques	52
3.2.3.2	Evolutions piézométriques	54
3.2.3.3	Hydrogéochimie des aquifères	57
3.2.3.4	Caractérisation hydrodynamique	57
3.2.3.5	Perspectives	58
3.2.4	La modélisation hydrogéologique	59
3.2.4.1	Modèles mathématiques, méthodes de résolution et codes de calcul	60
3.2.4.2	Modèle régional	61
3.2.4.3	Modèle sub-régional	68
3.2.4.4	Modèle local	70
3.2.4.5	Perspectives et recommandations	70
3.3	L'installation de dépôt en profondeur	71
3.3.1	L'architecture de référence	72
3.3.2	Les différentes étapes opérationnelles d'un dépôt en profondeur	77
3.3.2.1	Construction	80
3.3.2.2	Exploitation	88
3.3.2.3	Fermeture	90
3.3.2.4	Contrôle institutionnel	92
3.3.3	Le projet de démonstration PRACLAY	92
3.3.4	Les perspectives	94
3.4	Le comportement des déchets et des matériaux en conditions de dépôt	95
3.4.1	Le comportement des déchets conditionnés	95
3.4.1.1	Déchets vitrifiés	96
3.4.1.2	Combustibles usés	100
3.4.1.3	Gaines et embouts	102
3.4.1.4	Déchets bitumés	102
3.4.1.5	Déchets cimentés	104
3.4.1.6	Données sélectionnées pour la modélisation du champ proche	104
3.4.2	Le comportement des matériaux utilisés dans le dépôt en profondeur	104
3.4.2.1	Matériaux d'emballage et de suremballage	105
3.4.2.2	Matériaux de remblayage et de scellement	107
3.5	Le comportement des radionucléides dans l'Argile de Boom	109
3.5.1	Les caractéristiques de l'Argile de Boom en matière de migration	110
3.5.1.1	Dominance de la diffusion	111
3.5.1.2	Caractéristiques géochimiques	112
3.5.1.3	Interactions entre l'argile et les solutés	113
3.5.1.4	Présence de matière organique	114
3.5.2	Le comportement des radionucléides dans l'Argile de Boom	115
3.5.3	Les paramètres de migration	117
3.5.4	Le rôle de la matière organique	118
3.5.4.1	Capacité d'ultrafiltration de l'Argile de Boom	118

3.5.4.2	Comportement de l'américium	120
3.5.4.3	Comportement de l'uranium, du neptunium et du plutonium	120
3.5.5	La variabilité des paramètres de migration sur l'épaisseur d'argile	121
3.5.6	Les données utilisées pour les évaluations de la sûreté à long terme	122
3.5.7	Les perspectives	123
3.6	Les perturbations induites dans l'Argile de Boom et son environnement	124
3.6.1	Les perturbations thermiques	124
3.6.1.1	Etudes expérimentales	125
3.6.1.2	Implications pour la conception des installations de dépôt	126
3.6.1.3	Impact thermique du dépôt	127
3.6.2	Les perturbations induites par l'excavation	129
3.6.2.1	Caractérisation et modélisation géomécanique	129
3.6.2.2	Zone perturbée par l'excavation	131
3.6.3	Les perturbations induites par les gaz	132
3.6.3.1	Génération de gaz	133
3.6.3.2	Transport du gaz	134
3.6.3.3	Impacts sur l'Argile de Boom	135
3.6.4	Les perturbations induites par les rayonnements	135
3.6.5	Les perturbations géochimiques	136
3.6.5.1	Migration des toxiques chimiques	136
3.6.5.2	Migration des fronts chimiques	138
3.7	La modélisation de la biosphère	139
3.8	Les Argiles Yprésiennes comme formation-hôte alternative	141
3.8.1	Le contexte général	141
3.8.2	Le cadre géographique et géologique	142
3.8.3	Les caractéristiques des Argiles Yprésiennes à Doel	144
3.8.4	Les perspectives	146
Chapitre 4	Evaluer la sûreté radiologique à long terme : scénarios d'évolution normale et altérée	147
4.1	La méthodologie des évaluations de sûreté à long terme	150
4.1.1	Le développement des scénarios	150
4.1.2	L'évaluation des scénarios	152
4.2	Le développement des scénarios	154
4.2.1	L'identification des scénarios	155
4.2.2	La description des scénarios	156
4.2.2.1	Scénario d'évolution normale	157
4.2.2.2	Scénarios d'évolution altérée	160
4.3	L'évaluation des scénarios	163
4.3.1	Les arguments quantitatifs et qualitatifs	163

4.3.1.1	Indicateurs de sûreté classiques	164
4.3.1.2	Indicateurs de sûreté et de performance alternatifs	165
4.3.1.3	Arguments qualitatifs	165
4.3.2	L'évaluation du scénario d'évolution normale	166
4.3.2.1	Calculs de doses	166
4.3.2.2	Calculs d'indicateurs de sûreté et de performance alternatifs	179
4.3.3	L'évaluation des scénarios d'évolution altérée	182
4.3.4	Résultats et considérations complémentaires	184
4.4	La sous-criticité	188
4.5	Les perspectives	189
Chapitre 5	Evaluer les coûts : une méthodologie analytique, paramétrique et flexible	191
Chapitre 6	Conclusions et évaluation de la confiance acquise	195
6.1	Les principaux acquis	197
6.1.1	Les connaissances acquises et les questions ouvertes	197
6.1.2	Importance relative des incertitudes restantes	204
6.2	Éléments d'orientation pour le programme futur de recherche et développement méthodologique	209
6.2.1	Les axes principaux	209
6.2.2	Les éléments à considérer	210
6.2.3	Les prochaines étapes	215
6.3	L'évaluation de la confiance	218
Postface		227
Annexes		231
A.1	Figures, tables et encadrés	231
A.2	Sigles, acronymes et noms propres	236
A.3	Lectures complémentaires	238
A.4	Table de correspondance avec le rapport SAFIR 2	241
A.5	Avis final du comité de lecture du rapport SAFIR 2	244

1 Introduction

En Belgique, la gestion des déchets radioactifs, qu'ils soient issus de la production électronucléaire, d'applications industrielles des rayonnements ionisants, des activités médicales ou encore de la recherche, fait l'objet d'études approfondies depuis longtemps déjà. Ainsi, dès 1974, le Centre d'étude de l'énergie nucléaire (CEN-SCK) à Mol entama un programme de recherche et développement sur la gestion à long terme des déchets de haute activité et/ou de longue durée de vie, autrement dit des déchets des catégories B et C. Très vite, il se focalisa sur la solution préconisée au niveau international afin d'isoler ces déchets de l'homme et de l'environnement, à savoir leur mise en dépôt au sein d'une formation géologique stable et présentant des caractéristiques appropriées. Il choisit ensuite de concentrer ses travaux sur l'étude de la couche d'Argile de Boom située sous son site en tant que formation-hôte potentielle. Etant donné le manque d'expérience, tant au niveau national qu'au niveau international, en matière de creusement d'installations souterraines dans une argile de ce type, c'est-à-dire une argile peu consolidée, aussi appelée argile « peu indurée », à environ 200 mètres de profondeur, un des objectifs principaux du programme de recherche et développement initial du CEN-SCK fut d'évaluer et de démontrer la faisabilité d'une telle opération. C'est la raison pour laquelle le laboratoire souterrain de recherche HADES (*High-Activity Disposal Experimental Site*) fut construit très tôt dans le programme belge.

En créant l'ONDRAF, l'Organisme national des déchets radioactifs et des matières fissiles, par la loi du 8 août 1980, les autorités belges décidèrent de confier la gestion des déchets radioactifs à *un organisme unique sous contrôle public afin de garantir que l'intérêt public puisse prévaloir dans toutes les décisions à prendre en la matière*. Les missions et modalités de fonctionnement de l'ONDRAF furent fixées par l'arrêté royal d'exécution du 30 mars 1981, modifié et complété par celui du 16 octobre 1991, pris en exécution de la loi du 11 janvier 1991, elle-même modifiée et complétée par la loi du 12 décembre 1997. La loi de 1991 changeait également la dénomination de l'ONDRAF en Organisme national des déchets radioactifs et des matières fissiles *enrichies*.

Concrètement, l'ONDRAF est tenu de développer une politique de gestion cohérente et sûre pour tous les déchets radioactifs présents sur le territoire belge. Cette gestion comprend l'inventaire quantitatif et qualitatif des déchets radioactifs, leur enlèvement et leur transport, leur traitement et leur conditionnement, leur entreposage et leur gestion à long terme. A cette mission principale s'ajoutent des missions relatives notamment au déclassement des installations nucléaires désaffectées, à l'assainissement des passifs nucléaires et à la gestion des matières fissiles enrichies. Enfin, l'ONDRAF doit assurer le financement de ses missions à long terme. Le coût de l'ensemble de ses prestations, y compris les coûts de la gestion à court et à long terme, est supporté au prix coûtant par les producteurs de déchets.

Peu après sa création, l'ONDRAF entreprit d'instaurer les bases d'une gestion coordonnée des déchets radioactifs et de reprendre progressivement à sa charge la gestion des travaux entrepris par le CEN-SCK pour établir des solutions pour leur gestion à long terme qui soient à la fois sûres et réalisables en termes techniques et économiques. Aujourd'hui,

Déchets des catégories B et C

Les déchets radioactifs de catégorie C, qui sont moyennement à hautement calorifiques, possèdent une activité élevée et, pour la plupart, une longue durée de vie. Ceux de catégorie B, qui sont faiblement calorifiques, possèdent une longue durée de vie. Tous ces déchets sont d'office destinés au dépôt final en profondeur (voir aussi section 3.1).

Dans la suite du texte, le terme « déchets » est utilisé pour désigner des déchets radioactifs conditionnés, l'expression « combustibles usés » désigne tous les types de combustible usé issus des centrales nucléaires commerciales belges (déchets ZAGALS) et l'expression « déchets vitrifiés » désigne les déchets vitrifiés issus du retraitement de ces combustibles (déchets ZAGALC) (voir aussi section 3.1).

la gestion courante des déchets radioactifs est bien maîtrisée ; leur gestion à long terme, elle, est toujours au stade de la recherche et du développement. (Elle est toutefois a priori relativement avancée pour les déchets de catégorie A, qui font l'objet d'un programme séparé dans lequel le choix du type de dépôt final, en surface ou en profondeur, est ouvert.)

La solution étudiée par l'ONDRAF pour la gestion à long terme des déchets radioactifs des catégories B et C est leur mise en dépôt au sein d'une formation géologique appropriée. Cette solution repose sur le principe de la concentration et du confinement des radionucléides contenus dans les déchets. Elle implique donc l'interposition, entre ces derniers et la biosphère, d'une série de barrières destinées à protéger aussi longtemps que nécessaire l'homme et l'environnement des risques que ces déchets présentent.

Bien entendu, la conception et les modalités de construction, d'exploitation et de fermeture d'une installation de dépôt final en profondeur doivent respecter les dispositions du cadre légal et réglementaire national et international applicable à ce type d'installation, c'est-à-dire à une installation mixte souterraine et nucléaire. Ces dispositions peuvent fondamentalement se répartir en cinq types d'exigences :

- des exigences en matière de sûreté radiologique à court et à long terme ;
- des exigences liées à la protection non radiologique de l'homme et de l'environnement ;
- des exigences en matière de sûreté nucléaire ;
- des exigences en matière de sûreté conventionnelle, y compris les exigences liées à la construction et à l'exploitation d'installations souterraines ;
- des exigences en matière de responsabilité civile.

A ce jour, le programme de recherche et développement a essentiellement porté sur la sûreté radiologique à long terme.

Dans la réglementation belge, une installation de dépôt en profondeur est considérée comme une installation nucléaire conventionnelle.

Ce chapitre introductif retrace dans les grandes lignes le programme de recherche et développement méthodologique de l'ONDRAF relatif à la gestion à long terme des déchets des catégories B et C et situe le rapport SAFIR 2 ainsi que son *aperçu technique* dans ce cadre. Plus précisément, le rapport SAFIR 2 marque la fin de la deuxième phase du programme de travail de l'ONDRAF, fixée de façon relativement arbitraire à fin 2000. Il fait suite au rapport SAFIR (1989) qui clôturait, lui, la première phase de ce programme (1974–1989).

1.1	La première phase de R&D méthodologique et le rapport SAFIR (1974–1989)	3
1.2	La deuxième phase de R&D méthodologique et le rapport SAFIR 2 (1990–2000)	4
1.3	L'aperçu technique du rapport SAFIR 2	7

1.1 La première phase de R&D méthodologique et le rapport SAFIR (1974–1989)

Soucieux de rentabiliser l'expérience et les résultats prometteurs déjà obtenus par le CEN•SCK en matière de gestion à long terme des déchets des catégories B et C, l'ONDRAF décida au début des années quatre-vingt d'approfondir les études en cours. Il fit donc du CEN•SCK son partenaire privilégié pour tous les aspects de recherche et développement qui supporteraient désormais son programme de travail dans ce domaine, d'autant plus que le CEN•SCK possédait un outil de recherche unique au monde : le laboratoire souterrain HADES.

Conformément aux recommandations de la Commission d'évaluation en matière d'énergie nucléaire créée en 1975 par le ministre André Oleffe, l'ONDRAF décida en 1984 de préparer un document de synthèse présentant et analysant de façon systématique les résultats de l'ensemble des travaux relatifs à la mise en dépôt en profondeur accumulés de 1974 à 1989 en Belgique ainsi que ceux des évaluations de la sûreté radiologique à long terme effectuées sur cette base. Ces recommandations précisaient en effet notamment que *Les déchets de haute activité doivent rester accessibles et rester sous contrôle aussi longtemps qu'une solution définitive ou suffisamment sûre n'aura pas été trouvée. Une évaluation décennale de ce risque devrait être faite avant de poursuivre dans la voie nucléaire.* La commission considérait en outre que l'énergie nucléaire peut être utilisée à certaines conditions : *Dans l'état actuel des connaissances, il importe de procéder à une réévaluation décennale des problèmes liés à l'utilisation de l'énergie nucléaire, avant de poursuivre dans cette voie, notamment tant qu'une solution définitive ou du moins suffisamment sûre n'a pas été effectivement mise en application pour les déchets de haute activité ainsi que pour le contrôle du tritium, des gaz nobles, du carbone 14 et de l'iode 129.*

Connu sous le nom de *rapport SAFIR (Safety Assessment and Feasibility Interim Report)*, le rapport de sûreté et de faisabilité préparé en collaboration avec le CEN•SCK et Belgatom principalement fut remis en mai 1989 par l'ONDRAF à son ministre de tutelle, le secrétaire d'Etat à l'énergie. Il devait permettre aux autorités de l'époque d'émettre un premier avis sur les qualités de la couche d'Argile de Boom à l'aplomb de la zone nucléaire de Mol–Dessel en tant que formation-hôte potentielle pour la mise en dépôt final des déchets des catégories B et C et d'autoriser le cas échéant la poursuite du programme de recherche et développement en la matière.

La commission d'experts belges et étrangers établie en 1989 par le secrétaire d'Etat à l'énergie pour évaluer le rapport SAFIR en confirma les conclusions, à savoir que les argiles peu indurées, et en particulier l'Argile de Boom sous la zone nucléaire de Mol–Dessel, peuvent être envisagées pour la mise en dépôt final des déchets des catégories B et C, car elles peuvent offrir une protection efficace à très long terme. Cette argile peu indurée se révélait en effet être une roche très peu perméable, dotée d'un caractère plastique qui lui confère un bon pouvoir autocicatrisant et possédant de surcroît une forte capacité à fixer les radionucléides, et donc à retarder leur migration vers la biosphère. La Commission d'évaluation SAFIR jugea aussi que, moyennant quelques adaptations, le programme de recherche et développement proposé par l'ONDRAF en collaboration avec le

Mise en dépôt

final Mise en dépôt de déchets radioactifs sans intention de les récupérer.

Installation de dépôt final

Construction destinée à recevoir des déchets radioactifs dans une optique de gestion passive à long terme.

Système de dépôt final

Ensemble constitué par l'installation de dépôt final et la formation-hôte. Ce système est situé dans un environnement lui-même formé des aquifères situés de part et d'autre de la formation-hôte et de la biosphère (voir aussi section 2.2.1).

CEN•SCK pour la période 1989–1994 était cohérent et constituait une suite logique aux efforts consentis depuis 1974. Enfin, elle recommanda d'amplifier rapidement les efforts sur certains thèmes liés à la sûreté à long terme et à la géologie de la formation-hôte, ainsi que d'inclure d'autres formations-hôtes et localisations dans le programme de recherche, et notamment d'étudier les Argiles Yprésiennes à l'aplomb de la zone nucléaire de Doel comme formation alternative.

1.2 La deuxième phase de R&D méthodologique et le rapport SAFIR 2 (1990–2000)

Autorisé à poursuivre ses travaux en matière de dépôt final en profondeur pour les déchets des catégories B et C, l'ONDRAF réévalua en 1990 son programme de recherche et développement afin de l'aligner sur les recommandations de la Commission d'évaluation SAFIR. Ce programme était, et est du reste toujours, un programme *méthodologique* : il devait établir s'il est faisable, d'un point de vue technique comme d'un point de vue économique, de concevoir puis de mettre en œuvre sur le territoire belge une solution de dépôt final en profondeur pour les déchets des catégories B et C qui soit sûre, sans toutefois préjuger du lieu où cette solution serait réalisée le cas échéant. Nécessairement multidisciplinaire, ce programme est aussi fortement itératif (fig. 1.1).

Etant donné son caractère méthodologique, le programme de travail de l'ONDRAF était bâti autour de la caractérisation de formations argileuses et de sites *de travail*. Plus précisément, les deux formations et les deux sites étudiés étaient, et sont toujours, dotés des statuts suivants :

- *Argile de Boom et zone nucléaire de Mol–Dessel* : formation-hôte de référence et site de référence ;
- *Argiles Yprésiennes et zone nucléaire de Doel* : formation-hôte alternative et site alternatif.

(La Belgique n'ayant pas, à ce jour, choisi de site de dépôt, l'emploi du terme « site » n'implique aucune notion de mise en œuvre.) Le programme de l'ONDRAF, qui est donc centré sur l'étude de l'Argile de Boom à l'aplomb de la zone nucléaire de Mol–Dessel, donnait en outre la priorité à l'étude de solutions pour les déchets considérés comme présentant les contraintes les plus sévères en termes radiologiques et thermiques.

Architecture de

dépôt Expression utilisée pour désigner la géométrie d'une installation de dépôt et les matériaux utilisés pour sa construction. L'expression « architecture de dépôt » remplace le terme « concept » utilisé jusqu'à présent.

Concrètement, le programme de recherche et développement méthodologique de l'ONDRAF devait lui permettre de développer l'ensemble des méthodes et d'acquérir l'ensemble des connaissances nécessaires pour permettre une évaluation approfondie de la sûreté et de la faisabilité de la mise en dépôt en profondeur des déchets des catégories B et C dans une argile peu indurée : caractérisation des déchets à mettre en dépôt, caractérisation et évaluation de formations-hôtes et de leur environnement, développement d'une architecture de dépôt, compréhension des interactions au sein de l'installation de dépôt, développement d'une méthodologie d'évaluation des performances et de la sûreté radiologique à long terme d'un tel dépôt, développement d'une méthodologie d'évaluation des coûts liés à sa réalisation et préparation d'une expérience de démonstration en vraie grandeur de sa faisabilité. Il ne faisait par contre qu'effleurer l'étude des opérations de

mise en dépôt des déchets proprement dites et l'étude de la sûreté en exploitation, dans la mesure où de telles études requièrent une définition relativement précise des caractéristiques des installations sur lesquelles elles portent. (Voir encadré page suivante pour une description plus détaillée des principaux objectifs du programme de recherche et développement méthodologique de l'ONDRAF.)

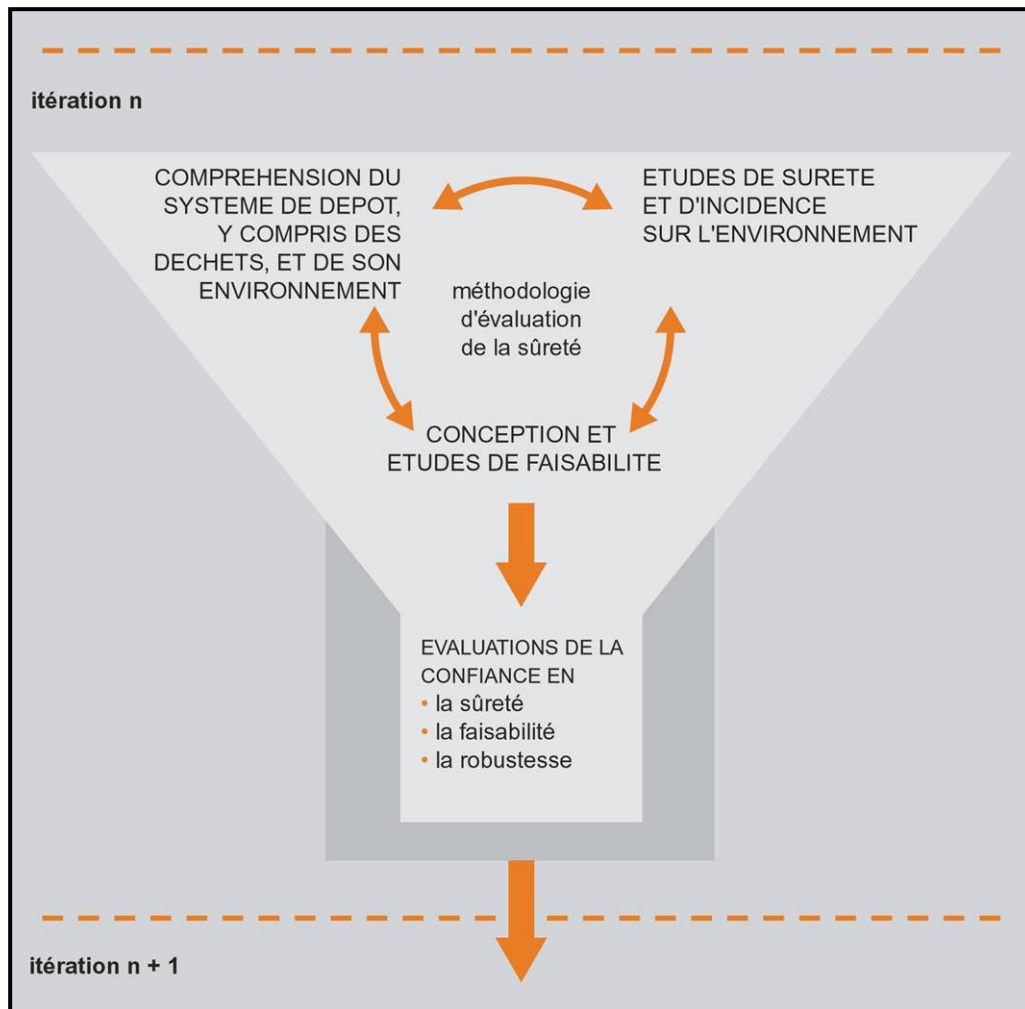


Figure 1.1 Approche générale suivie dans le cadre du programme belge de recherche et développement méthodologique relatif au dépôt final en profondeur (voir aussi fig. 2.2).

La publication par l'ONDRAF du *rapport SAFIR 2* en décembre 2001 a clôturé la deuxième phase de son programme de recherche et développement méthodologique (1990–2000), sans pour autant en marquer la fin. Le rapport SAFIR 2 se limite strictement aux avancées techniques et scientifiques (à l'exclusion des aspects de société) de ce programme et évalue la confiance en la sûreté, la faisabilité et la robustesse du système étudié. Il ébauche en outre en termes techniques et scientifiques la suite que l'ONDRAF se propose d'y donner. Il a fait l'objet d'une évaluation par un comité d'experts belges créé à l'initiative du Conseil d'administration de l'ONDRAF en vue d'accompagner sa finalisation et d'émettre des recommandations pour la suite du programme de travail de l'ONDRAF en matière de

Principaux objectifs de la deuxième phase du programme de recherche et développement méthodologique de l'ONDRAF (1990–2000), qui tiennent compte des recommandations les plus importantes de la Commission d'évaluation SAFIR (1990)

en matière de caractérisation des déchets à mettre en dépôt,

- préciser l'inventaire qualitatif et quantitatif des déchets à mettre en dépôt et prendre en compte le scénario de non-retraitement des combustibles usés en plus du scénario de retraitement complet, déjà considéré ;
- établir, sur base des règles générales approuvées par l'autorité compétente, des critères d'acceptation des déchets destinés au dépôt en profondeur ;

en matière d'évaluation des formations-hôtes et de leur environnement,

- mettre en évidence et caractériser les discontinuités structurales (failles, etc.) et les hétérogénéités lithologiques de l'Argile de Boom et étudier leur impact sur la migration des radionucléides ;
- étudier le comportement thermo-hydro-mécanique de l'Argile de Boom ;
- affiner la compréhension et la modélisation de l'hydrogéologie régionale et locale autour de la zone nucléaire de Mol-Dessel ;
- caractériser les Argiles Yprésiennes sous la zone nucléaire de Doel de façon préliminaire ;

en matière de développement d'une architecture de dépôt,

- concevoir l'installation de dépôt de façon à maximiser l'épaisseur d'argile non perturbée et à séparer physiquement les différentes classes de déchets les unes des autres ;
- approfondir la conception de la partie de l'installation de dépôt destinée aux déchets hautement calorifiques et évaluer les performances de ses éléments constitutifs ;
- démontrer la possibilité de creuser des galeries de dimensions appropriées dans l'Argile de Boom au moyen de techniques industrielles éprouvées ;
- étudier la possibilité de sceller des installations souterraines de dépôt ;
- préparer une démonstration en vraie grandeur de la possibilité de mettre en œuvre l'architecture de dépôt développée et de mettre en place des déchets vitrifiés hautement calorifiques (expérience PRACLAY) ;

en matière de compréhension des interactions au sein de l'installation de dépôt,

- comprendre et quantifier les conséquences de la génération, de l'accumulation et de la migration de gaz au sein du dépôt ;
- étudier le comportement en conditions de dépôt des différentes matrices de déchets et de l'emballage supplémentaire prévu autour des déchets hautement calorifiques ainsi que leur compatibilité avec l'Argile de Boom ;

en matière d'évaluation de la sûreté à long terme,

- analyser les conséquences de la migration de certains radionucléides non retardés dans l'argile ;
- poursuivre l'étude du comportement des radionucléides critiques dans l'Argile de Boom et, en particulier, étudier l'influence de la matière organique et des fronts chimiques générés par les barrières ouvragées ;
- mettre à jour les évaluations des conséquences radiologiques d'un dépôt de déchets des catégories B et C et effectuer les premières estimations de celles d'un dépôt de combustibles usés ;
- définir et utiliser des indicateurs de sûreté à long terme autres que la dose et le risque ;
- effectuer une première étude de la chimiotoxicité des déchets ;

en matière d'évaluation des coûts,

- développer une méthode d'évaluation des coûts de mise en dépôt.

dépôt en profondeur. Il fera l'objet en 2002 d'un examen au niveau international, sous l'égide de l'Agence pour l'énergie nucléaire (AEN) de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE).

Le rapport SAFIR 2 a trois objectifs :

- fournir aux autorités et à toutes les autres parties concernées une synthèse structurée de toutes les informations techniques et scientifiques disponibles pertinentes relatives à la mise en dépôt final des déchets des catégories B et C au sein d'une formation argileuse peu indurée, afin de leur permettre d'évaluer les progrès réalisés en termes de faisabilité technique et d'évaluation de la sûreté radiologique à long terme ;
- permettre d'intensifier la concertation avec les autorités de sûreté nucléaire (Agence fédérale de contrôle nucléaire ou AFCN), afin de mieux s'accorder sur les efforts de recherche encore à mener et sur les principes de l'évaluation de sûreté, ainsi qu'afin de préciser les modalités d'application des règlements en vigueur au cas spécifique d'un dépôt en profondeur ;
- constituer une des bases techniques et scientifiques en vue d'un dialogue large avec toutes les parties concernées par la gestion à long terme des déchets radioactifs.

Ce n'est pas un rapport de sûreté au sens strict : il n'accompagne en effet aucune demande d'autorisation. Il se rapproche par contre d'un rapport relatif à l'état de l'art en Belgique.

Le rapport SAFIR 2 est lui-même accompagné de trois documents essentiels :

- le *présent document*, qui constitue un *aperçu technique du rapport SAFIR 2* et qui reprend également en annexe l'avis final du comité de lecture du rapport SAFIR 2 ;
- une *brochure* synthétisant les messages clés du rapport SAFIR 2 à l'intention d'un public plus large ;
- le document *Vers une gestion durable des déchets radioactifs*, qui traite de l'intégration des dimensions technique et de société de la gestion à long terme des déchets radioactifs.

1.3 L'aperçu technique du rapport SAFIR 2

Le présent document est l'aperçu technique du rapport SAFIR 2, disponible en version intégrale sur le CD-ROM joint. Ses objectifs et sa portée sont donc identiques à ceux du rapport SAFIR 2. Sa structure a toutefois été adaptée en vue d'une lecture plus aisée et il se focalise sur les éléments clés du programme belge, sur ses acquis propres et sur les arguments qualitatifs qui sous-tendent les évaluations de la sûreté radiologique à long terme. Les chapitres 2 et 3 visent à répondre à la question de savoir *comment, pratiquement, isoler les déchets radioactifs de la biosphère de façon sûre*. Le chapitre 2 est essentiellement consacré à l'ensemble des exigences sur lesquelles doit se fonder la conception d'un dépôt final en profondeur, exigences qui se ramènent fondamentalement à une exigence de sûreté, une exigence de faisabilité et une exigence de robustesse. Après avoir fait le point sur les déchets à mettre en dépôt, le chapitre 3 passe en revue

l'ensemble des acquis scientifiques et méthodologiques du programme, centré sur l'étude de l'Argile de Boom à l'aplomb de la zone nucléaire de Mol-Dessel, à l'exception toutefois des acquis relatifs aux évaluations de sûreté. Il synthétise les connaissances actuelles en matière de comportement des déchets en conditions de dépôt ainsi qu'en matière de caractérisation et de comportement de la formation-hôte de référence et de l'environnement du système de dépôt, décrit l'architecture de référence actuellement envisagée par l'ONDRAF pour l'installation de dépôt en profondeur ainsi que la façon dont elle serait construite et exploitée et, enfin, présente très succinctement les connaissances actuelles relatives aux Argiles Yprésiennes, étudiées en tant que formation-hôte alternative. Le chapitre 4, lui, est entièrement consacré aux évaluations de la sûreté radiologique à long terme. A défaut de pouvoir prouver la sûreté radiologique à long terme d'un dépôt final par l'expérience industrielle directe, il est en effet possible d'évaluer de façon indirecte *si le mode d'isolement et de confinement des déchets radioactifs envisagé est sûr* à long terme. Ces trois chapitres sont suivis d'un court chapitre 5 consacré à l'évaluation du coût de la réalisation d'un dépôt en profondeur ainsi que d'un dernier chapitre de conclusions, qui rassemble les principaux résultats engrangés jusqu'à présent, propose les grandes lignes d'un programme futur et évalue le niveau de confiance actuel dans la solution de dépôt final étudiée. Enfin, cet aperçu technique du rapport SAFIR 2 s'achève par une postface. Cinq annexes le complètent : une liste des figures, tables et encadrés, une liste des sigles et acronymes les plus courants, une liste de lectures complémentaires, une table de correspondance détaillée destinée à aider le lecteur à retrouver plus aisément dans le rapport SAFIR 2 les informations additionnelles qu'il pourrait souhaiter, et l'avis final du comité de lecture du rapport SAFIR 2. Il ne comporte pas de bibliographie, dans la mesure où il aurait été à la fois difficile et délicat de faire une sélection parmi les très nombreuses références possibles. Le lecteur intéressé trouvera par contre une bibliographie par chapitre sur le CD-ROM joint.

2 Assurer la sûreté et la faisabilité : les principes directeurs du développement d'un dépôt final en profondeur

Deux options peuvent a priori être envisagées pour assurer la gestion à long terme des déchets radioactifs : d'une part, l'option de *dilution et de dispersion* immédiate dans la biosphère de la radioactivité contenue dans les déchets, option qui est couramment appliquée, quoique dans des limites réglementaires strictes, aux rejets liquides et gazeux ; d'autre part, l'option de *concentration et de confinement*, qui consiste à isoler les déchets de la biosphère durant assez longtemps que pour permettre une décroissance suffisante de l'activité des radionucléides qu'ils contiennent avant leur relâchement inéluctable à long terme dans la biosphère, où ils seront alors dilués et dispersés progressivement (fig. 2.1).

Pour les déchets des catégories B et C, seule l'option de concentration et de confinement est jugée responsable au niveau international. Elle peut se matérialiser par leur entreposage dans des bâtiments de surface spécialement conçus ou par leur mise en dépôt final dans une installation souterraine adéquate. Alors que la première solution imposerait aux générations futures des mesures actives d'entretien et de suivi pendant très longtemps, la seconde peut a priori être conçue de façon à être intrinsèquement sûre, et donc à ne requérir aucune intervention, à court ni même à long terme. C'est elle que l'ONDRAF, comme du reste la plupart des pays confrontés à la question de la gestion de déchets des catégories B et C, a toujours étudiée en priorité comme solution de référence.

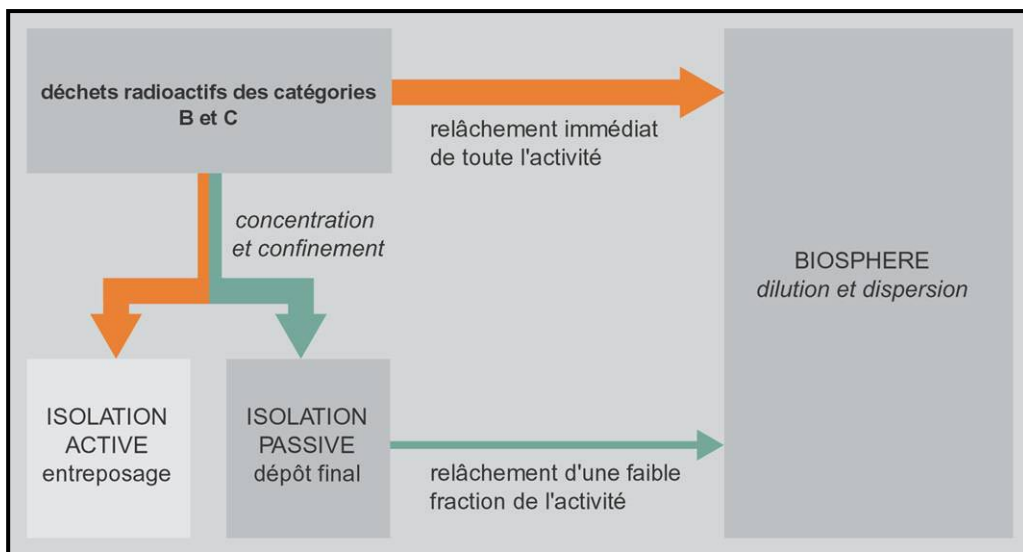


Figure 2.1 Les options envisageables pour la gestion à long terme des déchets radioactifs. L'option étudiée par l'ONDRAF pour la gestion des déchets des catégories B et C est celle de la concentration et du confinement par la voie d'une mise en dépôt final.

Evaluation de

sûreté Examen circonstancié des conséquences et des risques associés à une nouvelle pratique éventuelle. Cette évaluation s'effectue sur la base de comparaisons entre les résultats obtenus et des critères et limites acceptés au plan national ou international ainsi que sur la base d'arguments qualitatifs. Elle se fait de façon itérative, en parallèle avec les travaux de recherche et développement.

La conception et la mise en œuvre d'une solution de dépôt final en profondeur pour la gestion à long terme des déchets des catégories B et C est un processus complexe de longue haleine. Bien que l'objectif général soit aisé à formuler — protéger l'homme et l'environnement des effets néfastes potentiels des déchets radioactifs, à court comme à long terme — la solution est nettement moins aisée à concevoir. Elle doit en effet rester sûre pendant des échelles de temps qui dépassent de loin celles habituellement prises en compte par notre société, ce qui implique qu'elle ne peut guère s'appuyer sur l'expérience d'autres réalisations similaires. Elle fait aussi nécessairement intervenir un grand nombre de disciplines, comme la géologie et l'hydrogéologie, le génie civil et minier, la géochimie, la chimie des radionucléides la science des matériaux ou encore les statistiques et l'analyse numérique. Sa réalisation, depuis le début de la phase de recherche et développement méthodologique jusqu'à la fermeture du dépôt et à la période de contrôle institutionnel qui y fera suite, nécessite par ailleurs plusieurs dizaines d'années et s'effectue nécessairement par étapes.

Concrètement, la méthode suivie pour aboutir à une solution de dépôt sûre ainsi que techniquement et économiquement réalisable consiste à travailler *de façon itérative*, dans le cadre d'un *processus en étapes progressif et flexible* (fig. 2.2). Ce processus vise à rassembler de façon cohérente les résultats des travaux de recherche et développement effectués dans tous les domaines techniques et scientifiques concernés, ainsi que les évolutions du cadre légal et réglementaire, pour améliorer en permanence la connaissance et la conception du système de dépôt et pour affiner les évaluations de sûreté. Il intègre donc les aspects de compréhension, de conception, de construction, d'exploitation et de fermeture de façon globale, afin d'identifier en temps voulu les points à approfondir. Ainsi par exemple l'architecture du dépôt a-t-elle une influence directe sur le système de mise en place des déchets et vice-versa. Les conclusions des évaluations de sûreté, qui conditionnent le passage de chaque phase de réalisation à la suivante, et l'évolution de l'architecture du dépôt donnent à leur tour matière à de nouveaux travaux d'investigation, et ainsi de suite. L'architecture de dépôt de référence évolue ainsi progressivement vers l'architecture finale. Il en va de même pour les évaluations de sûreté.

Après avoir rappelé les objectifs d'un dépôt final en profondeur, ce deuxième chapitre précise les deux catégories d'exigences qui en découlent directement et auxquelles doit satisfaire la conception d'un tel dépôt. D'une part, des exigences générales, avec principalement une exigence de sûreté, tant durant l'exploitation du dépôt qu'après sa fermeture, une exigence de robustesse, afin que sa sûreté radiologique à long terme puisse être évaluée de façon convaincante, et une exigence de faisabilité. D'autre part, des exigences spécifiques à un dépôt dans l'Argile de Boom et destinées à éviter que les caractéristiques intrinsèques des déchets à mettre en dépôt, les matériaux utilisés pour construire le dépôt et la construction du dépôt proprement dite n'entament la sûreté de la solution étudiée de façon inacceptable. Ce chapitre s'achève avec les aspects de gestion et d'assurance de la qualité qui, à terme, porteront sur toutes les phases de la réalisation du système de dépôt.

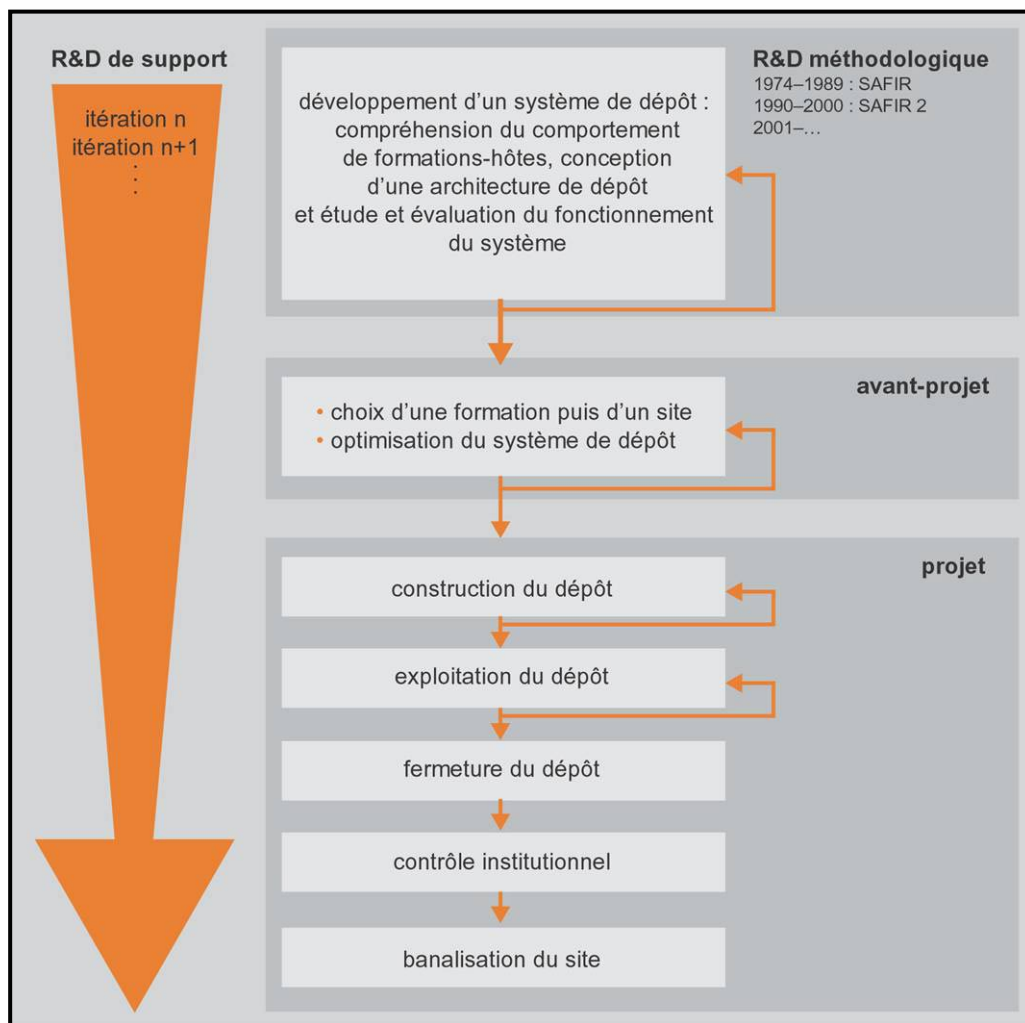


Figure 2.2 Les principales phases de la réalisation progressive d'un système de dépôt final. Cette réalisation se fait de manière flexible et itérative, les itérations pouvant entraîner des ajustements et, le cas échéant, des retours en arrière, à l'intérieur d'une même phase ou vers une phase antérieure (voir aussi fig. 1.1). Des évaluations de sûreté successives contribuent par ailleurs à la compréhension du fonctionnement du système de dépôt et permettent d'établir petit à petit la confiance nécessaire pour passer d'une phase du programme à la suivante.

2.1	Les objectifs d'un dépôt final en profondeur	13
2.2	Les exigences générales	14
2.2.1	La sûreté radiologique à long terme	15
2.2.2	La robustesse	20
2.2.3	La sûreté opérationnelle	21
2.2.4	La sous-criticité et le respect des <i>safeguards</i>	21
2.2.5	La protection de l'environnement	22
2.2.6	La flexibilité	22
2.2.7	La faisabilité	23
2.2.8	La récupérabilité	23
2.3	Les exigences spécifiques à l'Argile de Boom	24
2.4	La gestion et l'assurance de la qualité	25

2.1 Les objectifs d'un dépôt final en profondeur

Les travaux de gestion à long terme des déchets radioactifs menés en Belgique s'inscrivent dans un *cadre de sûreté radiologique* qui regroupe deux séries de principes fondamentaux : l'une en matière de gestion des déchets radioactifs, établie par l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), l'autre en matière de radioprotection (voir encadré page suivante), établie par la Commission internationale de protection radiologique (CIPR). Ces principes doivent constituer le fil conducteur de la réalisation de toute solution de dépôt final, depuis la conception du dépôt jusqu'à sa fermeture, en passant par sa construction et son exploitation. Ceci dit, le premier des trois principes de la radioprotection, le principe de justification des pratiques, se trouve en réalité d'emblée satisfait. La gestion des déchets radioactifs et, en particulier, leur mise en dépôt final, ne peuvent en effet être vues comme des pratiques en tant que telles, nécessitant une justification propre. Elles doivent au contraire être considérées comme faisant partie de pratiques beaucoup plus larges, comme la production d'énergie ou le diagnostic médical, qui, elles, sont jugées justifiées.

Les principes de gestion des déchets radioactifs établis par l'AIEA se traduisent par un double objectif en matière de mise en dépôt final.

- *Protéger l'homme et l'environnement* La mise en dépôt final doit protéger l'homme et l'environnement des risques que peuvent présenter les déchets radioactifs en les *concentrant* et en les *confinant* aussi longtemps que nécessaire.
- *Limiter le transfert des charges aux générations futures* La mise en dépôt final doit offrir une protection passive, autrement dit une protection qui, à terme, ne nécessitera plus aucune intervention des générations futures.

Le premier objectif, l'objectif de protection, comprend à la fois un volet de protection radiologique et un volet de protection non radiologique de l'homme et de l'environnement, lesquels s'inscrivent dans un cadre légal et réglementaire national et international. La réglementation belge de radioprotection se base sur les trois principes fondamentaux de la radioprotection et suit les directives européennes en la matière, elles-mêmes basées sur ces principes, soit la directive européenne 96/29/EUR fixant les normes de base relatives à la protection sanitaire de la population et des travailleurs contre les dangers résultant des rayonnements ionisants, et la directive européenne 97/43/EUR relative à la protection sanitaire des personnes contre les dangers des rayonnements ionisants lors d'expositions à des fins médicales. Les limites de dose effective imposées par la directive 96/29/EUR portent sur l'exposition totale résultant de l'ensemble des pratiques et des sources contrôlables auxquelles un individu donné est confronté. Elles sont de 1 mSv par an pour le public. La CIPR recommande par ailleurs que la dose maximale permise pour un dépôt en profondeur, c'est-à-dire la contrainte de dose du dépôt, soit limitée à 0.3 mSv par an (voir aussi section 4.3.1). Par comparaison, l'exposition moyenne aux rayonnements ionisants en Belgique représente une dose de 3.6 mSv par an, dose qui est avant tout d'origine naturelle (fig. 2.3). En matière de protection non radiologique de l'environnement, une directive essentielle, applicable au niveau belge, est la directive européenne 97/11/CE relative à l'évaluation des incidences de certains projets publics et privés sur l'environnement.

Dose efficace

Somme des doses équivalentes pondérées pour tous les organes et tissus du corps humain par un facteur qui exprime la sensibilité aux rayonnements. L'unité de dose efficace est le sievert (Sv). Par abus de langage, le terme « dose » est souvent utilisé à la place de « dose efficace ».

Dose équivalente

Produit de la dose absorbée par un facteur de pondération caractéristique du rayonnement et exprimant son impact biologique sur le tissu. L'unité de dose équivalente est le sievert (Sv).

Dose absorbée

Quantité d'énergie cédée par unité de masse par un rayonnement. L'unité de dose absorbée est le gray (Gy).

Limite de dose

Valeur maximale de la dose que les travailleurs exposés professionnellement ou les membres du public peuvent recevoir sur une période donnée. Cette limite ne prend en compte ni les sources naturelles, ni l'exposition médicale. Il en existe une pour les travailleurs, et une autre pour les membres du public (voir aussi fig. 2.3).

Contrainte de dose

Restriction imposée à la dose qu'une source, pratique ou tâche déterminée peut délivrer aux individus, et destinée à assurer que la limite de dose ne soit pas dépassée. La contrainte de dose est utilisée pour optimiser la protection contre les rayonnements ionisants.

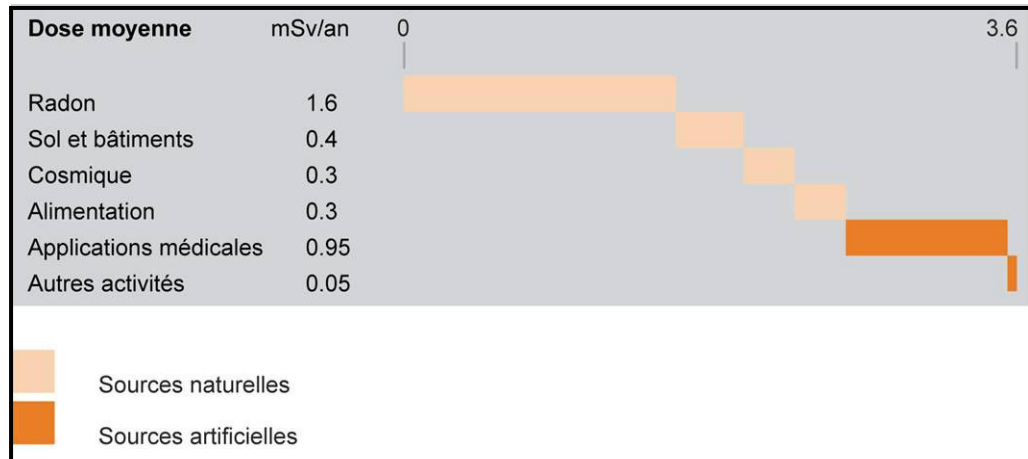


Figure 2.3 Exposition annuelle moyenne aux rayonnements ionisants en Belgique. Les sources naturelles sont à l'origine de 72 % de l'exposition moyenne de 3.6 mSv par an et les sources artificielles médicales sont à l'origine de 26 % de cette exposition.

Les trois principes fondamentaux de la radioprotection

principe de justification des pratiques : toute pratique impliquant une exposition aux rayonnements ionisants doit offrir plus d'avantages que d'inconvénients, sans pour autant que ces avantages doivent nécessairement bénéficier à ceux qui subissent les inconvénients.

principe d'optimisation de la protection, encore appelé principe ALARA (*As Low As Reasonably Achievable*) : les moyens de protection doivent être choisis de manière telle que les doses individuelles et le nombre de personnes exposées soient maintenus à un niveau aussi faible que raisonnablement possible, compte tenu des facteurs économiques et sociaux.

principe de limitation des doses individuelles : la dose de rayonnement reçue par les travailleurs exposés professionnellement et la population doit rester inférieure à des limites imposées.

2.2 Les exigences générales

Le double objectif d'un dépôt final en profondeur peut être traduit en une série d'exigences concrètes. Plus précisément, la conception d'un système de dépôt doit être telle que le système soit non seulement sûr, tant durant son exploitation qu'après sa fermeture, mais qu'il soit également robuste, afin que sa sûreté radiologique à long terme puisse être évaluée de façon convaincante, qu'il tienne compte des risques de criticité, que son impact non radiologique sur l'environnement soit inférieur aux normes en vigueur, qu'il soit développé et réalisé de manière flexible, qu'il soit bien entendu faisable et, éventuellement, que les déchets puissent y être récupérés pendant un certain temps.

Jusqu'à présent, c'est l'exigence de sûreté radiologique à long terme qui a été étudiée de la façon la plus approfondie dans le cadre du programme belge.

2.2.1 La sûreté radiologique à long terme

Tout système de dépôt en profondeur doit assurer quatre *fonctions de sûreté à long terme* qui, ensemble, déterminent son niveau de sûreté radiologique à long terme (voir aussi chapitre 4). Ces fonctions sont les fonctions

- de confinement physique ;
- de retard et d'étalement du relâchement ;
- de dilution et de dispersion ;
- de limitation de l'accessibilité.

Présentées ici comme des principes de base dans la conception d'une installation de dépôt final, ces fonctions se sont en réalité surtout révélées être un important outil de compréhension du fonctionnement du système de dépôt, d'évaluation de sa sûreté et de communication. Les travaux de recherche et développement méthodologique effectués durant la période 1990–2000 ont en effet permis de structurer la connaissance du système et de son environnement en établissant des liens précis entre leurs différents composants, les phases successives dans l'évolution du système et les fonctions de sûreté.

A l'exception de la troisième fonction de sûreté, qui est exercée par l'environnement du système de dépôt, chacune est remplie par un ou plusieurs composants du système, qui sont alors appelés *barrières* (figs. 2.4 et 3.23 ; table 3.7). Ces barrières successives, qui sont emboîtées les unes dans les autres, sont de natures différentes. Certaines sont artificielles ou « ouvragées » : ce sont les *emballages étanches* qui entourent les déchets de catégorie C, les plus contraignants en termes radiologiques et thermiques, ainsi que les composants de l'installation de dépôt destinés à s'opposer à la migration des radionucléides, comme les *matériaux de remblayage* et de scellement des galeries de dépôt. L'une d'elles est naturelle : c'est la *formation géologique hôte* qui entoure les barrières ouvragées. (Les *aquifères* qui se trouvent de part et d'autre de la formation-hôte et la *biosphère* n'ont aucun rôle de barrière. Qui plus est, ils sont susceptibles de modifications drastiques au cours du temps. Ils ne font pas partie du système de dépôt, mais bien de son *environnement*.) L'ensemble des composants de l'installation de dépôt, y compris les déchets, ainsi que la *partie* de la formation-hôte *perturbée par l'excavation* forment le *champ proche* ; la barrière géologique et les aquifères forment la *géosphère*, aussi appelée *champ lointain* (voir section 3.3 pour une description plus complète de l'installation de dépôt étudiée).

Ce n'est toutefois pas le nombre de barrières qui constitue la meilleure garantie de sûreté d'un système de dépôt, mais bien les exigences complémentaires qui leur sont imposées afin de faire en sorte que, quelles que soient les perturbations, il y aura toujours plusieurs mécanismes pour empêcher que le système présente un risque inacceptable. Ces exigences sont au nombre de trois :

- *mécanismes de fonctionnement diversifiés* : le fonctionnement des différentes barrières doit être basé sur des mécanismes physiques et chimiques variés, afin qu'elles ne puissent être sujettes aux mêmes types de défaillances ;

Barrière Formation géologique ou composant de l'installation de dépôt qui fait obstacle à l'écoulement de l'eau vers les déchets radioactifs mis en dépôt et à la migration des radionucléides contenus dans ces déchets vers la biosphère.

Environnement du système de dépôt

Ensemble formé par les aquifères situés de part et d'autre de la formation-hôte et la biosphère.

Biosphère Partie de la terre où vivent et se développent les hommes, les animaux et les plantes et où ils peuvent être exposés aux substances radioactives qui peuvent être relâchées par l'installation de dépôt.

Champ proche

Ensemble formé par les composants de l'installation de dépôt, y compris les déchets radioactifs, et la partie de la formation-hôte perturbée par l'excavation.

Champ lointain ou géosphère Ensemble formé de la formation-hôte et des aquifères qui l'entourent.

- *redondance partielle* : toute défaillance d'une barrière doit pouvoir être suffisamment compensée par une partie ou par l'ensemble des autres barrières ;
- *indépendance fonctionnelle maximale* : la défaillance ou le fonctionnement d'une barrière doit avoir un effet aussi faible que possible sur le fonctionnement des autres barrières.

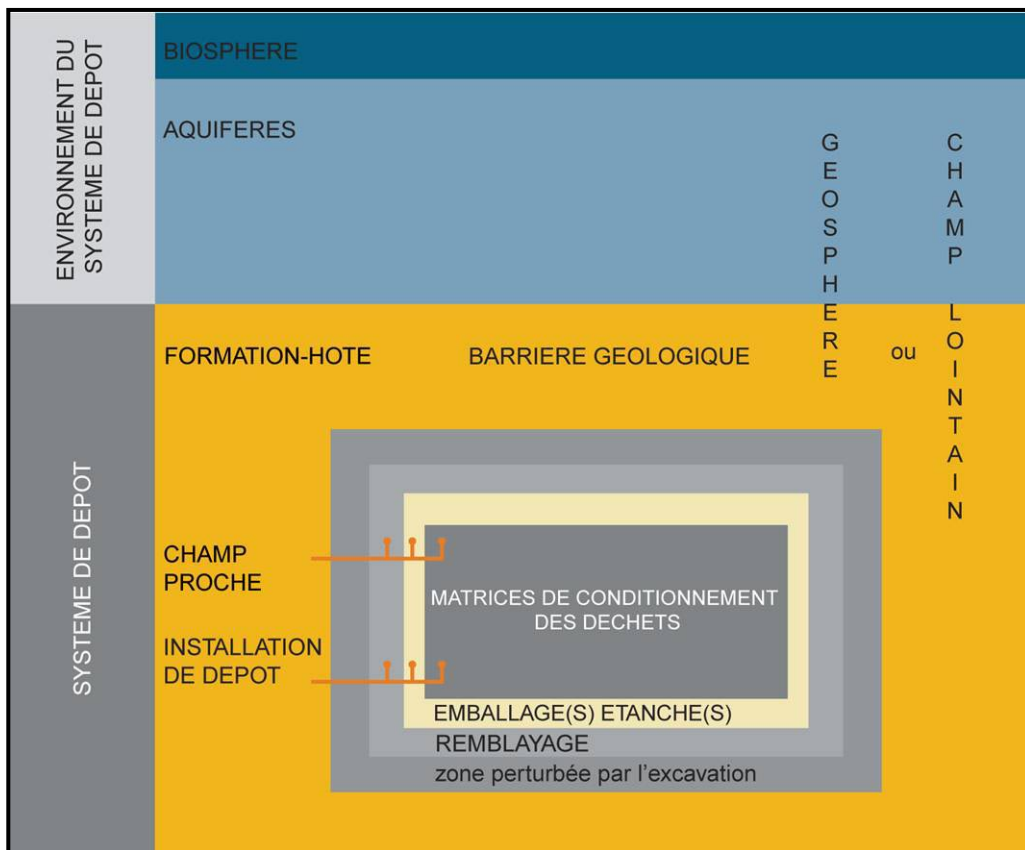


Figure 2.4 Schéma de principe d'une installation de dépôt final en profondeur et terminologie associée.

La première fonction de sûreté, la fonction de *confinement physique (C)*, vise à isoler les radionucléides de leur environnement direct, et en particulier de l'eau, leur vecteur de dispersion par excellence, afin d'éviter tout relâchement significatif de radionucléides. Elle doit également permettre de tirer au maximum parti de la décroissance radioactive avant que les autres fonctions de sûreté ne commencent à être mises à contribution. Cette décroissance radioactive est en effet un élément de sûreté intrinsèque, puisqu'elle implique une diminution inéluctable de la radiotoxicité, et donc du risque global, d'autant plus prononcée que le relâchement des radionucléides dans la biosphère est tardif.

Le confinement physique s'obtient grâce à l'interposition d'enveloppes artificielles, dont une au moins doit rester étanche durant un temps minimum (fig. 2.5). Il est en réalité surtout indispensable pour les déchets hautement calorifiques, qui sont aussi ceux qui contiennent l'activité la plus élevée en radionucléides critiques. Ces déchets sont donc

pourvus d'un emballage étanche, destiné à éviter les interactions entre l'eau et les radionucléides au minimum durant toute la phase dite « thermique » du système de dépôt, c'est-à-dire durant la période pendant laquelle leur présence dans l'installation de dépôt augmente significativement la température dans et autour de celle-ci (fig. 2.6). (Cet emballage étanche est en outre un élément de robustesse, car il simplifie les évaluations de sûreté en permettant de ne pas devoir considérer les phénomènes complexes de migration des radionucléides sous un gradient de température — voir section 2.2.2.) La fonction de confinement physique peut être subdivisée en deux sous-fonctions :

- la sous-fonction d'*étanchéité* (C1), qui est liée aux barrières ouvragées, et plus particulièrement à l'emballage étanche, et qui vise à *empêcher* l'eau d'entrer en contact avec les déchets ;
- la sous-fonction de *limitation des arrivées d'eau* (C2), qui repose principalement sur la barrière naturelle, mais aussi sur la capacité d'absorption de l'eau que peuvent avoir certaines barrières ouvragées, et qui vise à *retarder* le moment où les radionucléides, entrant en contact avec l'eau infiltrée.

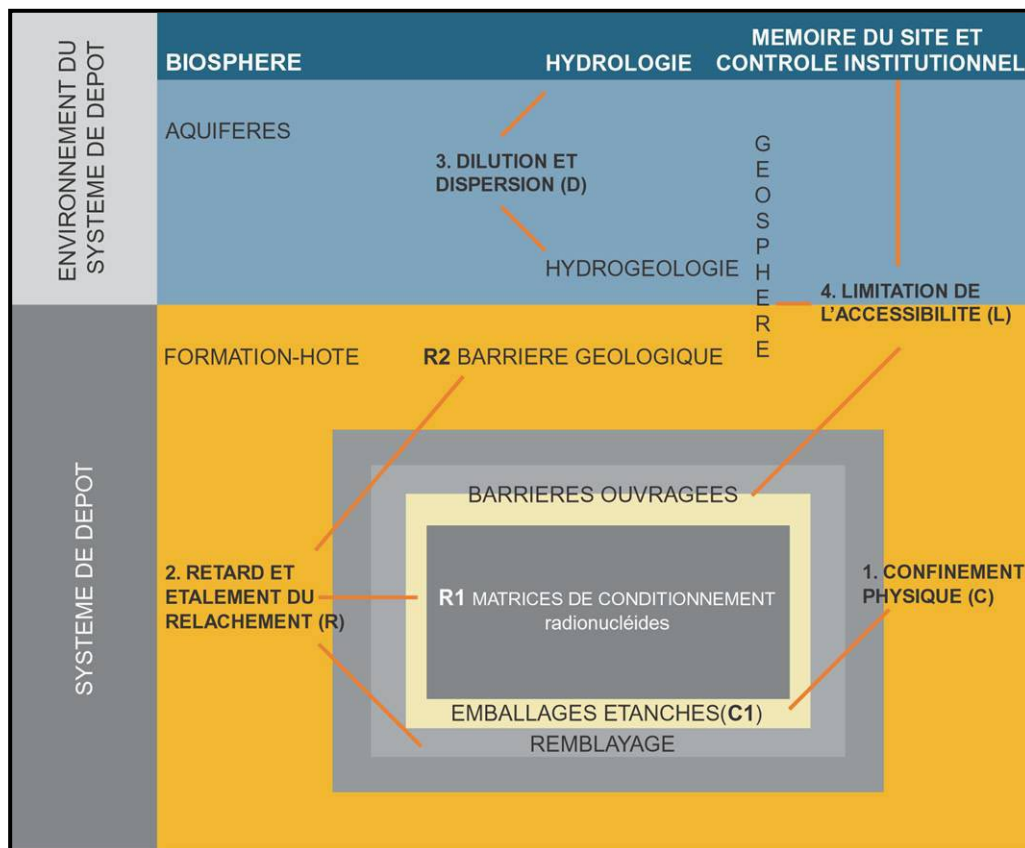


Figure 2.5 Les fonctions de sûreté à long terme du système de dépôt final en profondeur étudié qui sont considérées dans les évaluations de sûreté à long terme dans le cas du scénario d'évolution normale. Les différents composants du système peuvent assurer d'autres fonctions de sûreté non prises en compte dans les évaluations (voir aussi section 3.3 et table 3.7).

Parce qu'il n'est pas possible de garantir un confinement physique parfait des radionucléides jusqu'à ce que le niveau de la radioactivité à l'intérieur du dépôt devienne inoffensif, une deuxième fonction de sûreté doit être assurée une fois le confinement physique rompu : c'est la fonction de *retard et d'étalement du relâchement (R)*, qui doit ralentir autant que possible la migration des radionucléides vers la biosphère afin de permettre une décroissance maximale de leur radioactivité au sein même du système de dépôt. Elle doit faire en sorte qu'à aucun moment les radionucléides, surtout ceux de longue durée de vie, ne puissent être relâchés du système de dépôt et aboutir dans la biosphère en quantités inacceptables. Cette fonction peut elle aussi être subdivisée en deux sous-fonctions :

- la sous-fonction de *résistance à la lixiviation (R1)*, c'est-à-dire l'étalement dans le temps du relâchement des radionucléides grâce à la stabilité physicochimique des matrices de conditionnement ;
- la sous-fonction de *diffusion et de rétention (R2)* des radionucléides une fois libérés des matrices. Dans le cas de l'installation de dépôt étudiée, cette deuxième sous-fonction est assurée par le matériau de remblayage, qui est notamment choisi pour son aptitude à ralentir la migration des radionucléides par des processus de sorption ou par formation de précipités peu solubles, ainsi que par le dispositif de scellement des galeries de dépôt et par la barrière géologique (fig. 2.5). Une formation argileuse telle que l'Argile de Boom possède en effet la capacité de retarder la migration des radionucléides et est dotée d'un pouvoir autocicatrisant qui limite l'apparition de chemins de migration préférentiels.

Pour la mise en dépôt de déchets des catégories B et C dans l'argile, la fonction de retard et d'étalement du relâchement est normalement celle qui est la plus déterminante pour la sûreté radiologique à long terme. Elle est assurée en tout premier lieu par la formation-hôte.

Les flux de radionucléides qui parviendront malgré tout à atteindre la biosphère auront un effet potentiel sur l'homme et sur l'environnement d'autant plus faible qu'ils auront été *dilués et dispersés (D)*, par les écoulements souterrains dans les aquifères, ou par les écoulements de surface dans la biosphère (fig. 2.5). Cette troisième fonction de sûreté, qui est exercée par l'environnement du système de dépôt, ne peut toutefois avoir un poids élevé par rapport aux autres, sous peine de mettre en péril l'objectif de protection du dépôt, basé sur le principe de la concentration et du confinement. En outre, les composants de l'environnement du système de dépôt qui la remplissent sont peu robustes, en ce sens que leur fonctionnement à long terme est difficile à évaluer. Ils sont en effet fortement susceptibles d'évoluer, suite à des changements climatiques ou à des activités humaines par exemple.

Enfin, le système de dépôt doit isoler les déchets de façon telle que la probabilité et les conséquences d'une intrusion humaine, volontaire ou involontaire, restent limitées. C'est la fonction de *limitation de l'accessibilité (L)*, qui est exercée par les barrières ouvragées et la barrière naturelle, la période de contrôle et de surveillance qui suivra la fermeture du dépôt ainsi que les mesures prises pour entretenir le souvenir de sa présence (fig. 2.5). (Bien entendu, cette fonction implique que l'installation de dépôt soit construite à un endroit dépourvu de ressources naturelles exploitables.) Les conséquences d'une éventuelle

intrusion resteront d'autant plus limitées que l'installation possède une résistance intrinsèque élevée, autrement dit que les deux premières fonctions de sûreté en sont peu affectées.

Fonction de sûreté Action ou rôle que doit assurer le système de dépôt ou son environnement afin d'empêcher que les radionucléides contenus dans les déchets mis en dépôt puissent présenter un risque inacceptable pour l'homme ou pour l'environnement.

Les fonctions de sûreté sont au nombre de quatre.

La fonction de *confinement physique C* vise à isoler les radionucléides de leur environnement direct afin d'éviter tout relâchement significatif de radioactivité.

- La sous-fonction d'*étanchéité C1* empêche l'eau d'entrer en contact avec les déchets.
- La sous-fonction de *limitation des arrivées d'eau C2* retarde le moment où les barrières qui assurent une fonction d'étanchéité, puis les radionucléides, entrent en contact avec l'eau infiltrée.

La fonction de *retard et d'étalement du relâchement R* vise à ralentir autant que possible la migration des radionucléides vers la biosphère afin de permettre une décroissance maximale de leur radioactivité au sein même du système de dépôt.

- La sous-fonction de *résistance à la lixiviation R1* étale le relâchement des radionucléides par la matrice de déchets.
- La sous-fonction de *diffusion et de rétention R2* retarde et étale le relâchement des radionucléides.

La fonction de *dilution et de dispersion D* résulte en un abaissement de la concentration en radionucléides qui parviendront malgré tout à atteindre la biosphère et réduit donc leur effet potentiel sur l'homme et sur l'environnement.

La fonction de *limitation de l'accessibilité L* vise à isoler les déchets de façon telle que la probabilité et les conséquences d'une intrusion humaine restent limitées.

Les deux premières fonctions de sûreté sont assurées par le système de dépôt dans son ensemble ou par un ou plusieurs de ses composants, la troisième est assurée par l'environnement du système de dépôt et la quatrième est assurée à la fois par le système de dépôt, par son environnement et par des mesures de type institutionnel.

Les trois premières fonctions de sûreté prennent le relais les unes des autres de façon progressive dans l'évolution globale du système de dépôt, sans pour autant être mutuellement exclusives (fig. 2.6). Cette évolution a été découpée en quatre phases, qui reflètent les étapes caractéristiques du fonctionnement du système telles que révélées par les évaluations de sûreté effectuées pour le scénario d'évolution normale : la phase opérationnelle, la phase thermique, la phase d'isolation et la phase géologique. La fonction de confinement physique doit être assurée durant la *phase opérationnelle* du dépôt, qui s'étend de la mise en place des déchets jusqu'à sa fermeture et qui couvre quelques dizaines d'années, ainsi que durant la *phase thermique* qui suit, laquelle, selon les

Réserve de sûreté

Différence entre la durée réelle pendant laquelle la fonction de sûreté est exercée et la durée considérée dans les évaluations de sûreté, pour autant que cette dernière soit plus courte.

déchets, couvre quelques centaines à quelques milliers d'années. Elle reste significative durant la troisième phase du dépôt, la *phase d'isolation*, mais les fonctions prépondérantes sont alors la résistance à la lixiviation ainsi que la diffusion et la rétention par la formation-hôte. Cette phase se caractérise par un impact radiologique quasiment nul sur l'environnement du système de dépôt et est longue d'environ 10 000 ans. Les fonctions de diffusion et de rétention ainsi que de dilution et de dispersion, quant à elles, sont les fonctions prépondérantes durant la *phase géologique* qui suit et qui s'étend sur plus d'un million d'années. Cette phase se caractérise par un impact radiologique faible sur l'environnement. Enfin, la quatrième fonction de sûreté, la fonction de limitation de l'accessibilité, doit être active en permanence. Ceci étant, ces quatre fonctions ne sont pas limitées dans le temps. La deuxième et la troisième peuvent en effet être activées de façon anticipée en cas de défaillance de la ou des barrières qui doivent assurer la première fonction, car elles existent en réalité à l'état latent. La première et la deuxième peuvent par ailleurs continuer à s'exercer au-delà de la durée prise en compte dans les évaluations de sûreté, la différence constituant la réserve de sûreté.

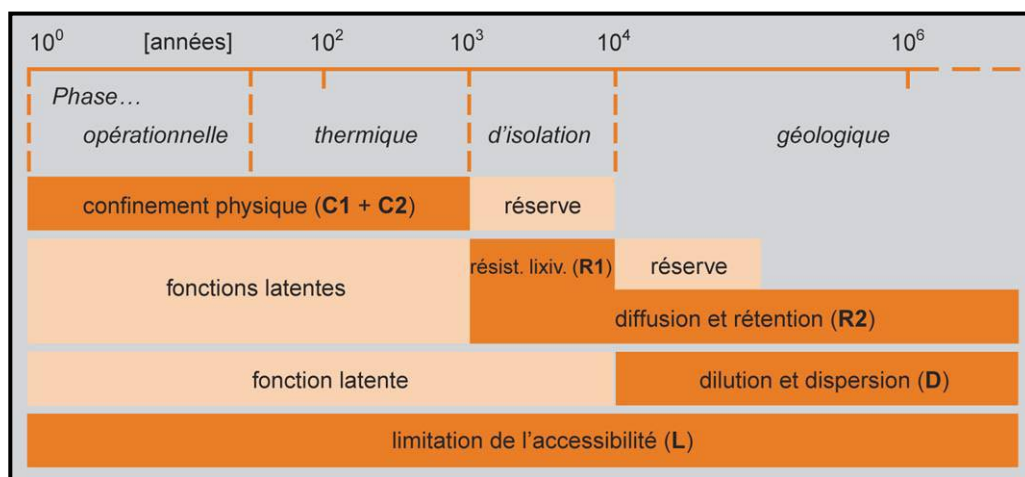


Figure 2.6 Les quatre phases de l'évolution normale d'un système de dépôt en profondeur pour les déchets de catégorie C les plus contraignants en termes radiologiques et thermiques, soit les déchets vitrifiés et les combustibles usés (voir section 3.1), et les fonctions de sûreté à long terme correspondantes.

2.2.2 La robustesse

Faute de pouvoir démontrer directement par l'expérience industrielle la sûreté radiologique à long terme d'un système de dépôt, il faut pouvoir établir la confiance dans cette sûreté en parvenant à l'évaluer de façon convaincante par voie indirecte (voir chapitre 4). La fiabilité des évaluations de sûreté dépend fortement de la qualité et, plus spécifiquement, de la robustesse du système de dépôt, c'est-à-dire de la mesure dans laquelle son fonctionnement réel est indépendant des incertitudes qui ne peuvent être levées. Cette robustesse peut résulter de deux types d'approche complémentaires : d'une part, l'approche qui consiste à rehausser les performances techniques du système, par exemple en employant plusieurs barrières ouvragées au lieu d'une seule, en les surdimensionnant

Robustesse

Mesure de l'indépendance du fonctionnement réel d'un système de dépôt par rapport aux incertitudes qui n'ont pu être levées.

et en faisant en sorte qu'elles soient indépendantes les unes des autres ; d'autre part, l'approche qui consiste à éliminer, ou tout au moins à réduire, les incertitudes qui subsistent, par exemple en optant pour une architecture de dépôt simple et des matériaux dont les mécanismes de dégradation sont suffisamment connus, en choisissant d'installer le dépôt dans un environnement hydrogéologique facile à modéliser, ou encore en entourant d'un emballage étanche les déchets de catégorie C les plus exigeants en termes radiologiques, de manière à éviter tout relâchement de radionucléides au cours de la phase thermique du dépôt et ainsi ne pas devoir prendre en compte les phénomènes complexes et mal connus de migration sous un gradient thermique. Le fait qu'un système de dépôt soit robuste facilite sa modélisation parce qu'il permet notamment de le simplifier.

2.2.3 La sûreté opérationnelle

En plus d'être sûre à long terme sous l'angle radiologique, toute installation de dépôt devra être sûre durant sa phase opérationnelle, que ce soit pour les travailleurs ou pour le public. Les caractéristiques de sa conception et les modalités de sa construction, de son exploitation et de sa fermeture devront donc être compatibles avec les dispositions du cadre légal et réglementaire applicable à une installation mixte nucléaire et souterraine. La sûreté opérationnelle devra bien entendu être démontrée de façon convaincante avant le passage éventuel de la phase de recherche et développement méthodologique en cours vers la phase d'avant-projet. Son évaluation détaillée ne sera toutefois possible que quand l'architecture du dépôt se trouvera à un stade de développement suffisamment avancé. Elle pourra alors également s'appuyer sur l'expérience pratique accumulée durant l'exploitation du laboratoire souterrain HADES ainsi que sur les enseignements tirés de l'expérience PRACLAY de démonstration en vraie grandeur dans l'argile, actuellement en cours de préparation (voir section 3.3.3).

Un point essentiel de l'évaluation de la sûreté opérationnelle sera la vérification de l'hypothèse selon laquelle l'application de mesures de qualité et de contrôle strictes aux colis de déchets radioactifs, y compris aux emballages étanches, rendra négligeable le risque de contamination du dépôt en cours d'exploitation, ce qui permettrait d'éviter de devoir considérer l'installation comme une zone contrôlée pour la contamination durant la phase opérationnelle. Une telle décision aurait en effet un impact considérable sur le mode d'exploitation, impact qui pourrait se reporter sur la conception, notamment avec la multiplication potentielle des voies d'accès à l'installation de dépôt, et, de là, sur la sûreté radiologique à long terme.

2.2.4 La sous-criticité et le respect des *safeguards*

Toute installation de dépôt en profondeur doit être conçue et exploitée de manière à réduire de façon drastique les risques directement liés à la présence de matières fissiles. Le premier risque est le risque de criticité ou risque de réaction nucléaire en chaîne spontanée et soutenue. Une situation de criticité lors de la mise en dépôt des déchets ou de l'évolution ultérieure du système pourrait en effet modifier les propriétés des champs proche et lointain, et notamment diminuer les performances des barrières, en particulier à

cause de la production périodique d'impulsions thermiques, ainsi que modifier l'inventaire des radionucléides présents. Le second risque est le risque de détournement de matières fissiles. Les modalités d'exploitation du dépôt devront donc se conformer aux exigences des traités internationaux de non-prolifération (*safeguards*). Elles devront notamment prévoir des systèmes précis de comptabilité et de traçabilité des matières fissiles, qui seront soumis à des vérifications internationales. Les aspects de sous-criticité ont été évalués de façon préliminaire, alors que le respect des *safeguards* n'a pas encore été pris en compte dans les études.

2.2.5 La protection de l'environnement

Toute installation de dépôt doit être conçue et exploitée de façon telle que son impact non radiologique sur l'environnement reste inférieur aux normes en vigueur. Ainsi, les substances chimiotoxiques présentes dans les déchets ou dans les composants utilisés pour la construction du dépôt ne pourront risquer de polluer son environnement et leur teneur dans les réserves d'eau potable ne pourra en aucun cas dépasser les limites établies. De même, l'augmentation inévitable de la température à proximité de l'installation en cas de mise en dépôt de déchets de catégorie C ne pourra réchauffer les eaux souterraines au point d'en modifier négativement la composition chimique et bactériologique, car cela pourrait les rendre moins aptes à la consommation ou à l'irrigation. Elle ne pourra pas davantage perturber la faune et la flore. Les études en la matière, encore préliminaires à l'heure actuelle, doivent s'inscrire dans un cadre légal univoque, cadre qui est aujourd'hui incomplet, en tout cas en ce qui concerne les augmentations maximales de température autorisées dans les aquifères.

2.2.6 La flexibilité

Le développement et la réalisation d'une installation de dépôt, y compris son exploitation, son contrôle et sa fermeture, devront s'effectuer de façon flexible. Cette flexibilité doit permettre une bonne adaptation à d'éventuelles nouvelles sortes de déchets ou à d'éventuels nouveaux conditionnements, une bonne adaptation aux conditions réelles en profondeur, des retours aisés sur des décisions antérieures, qu'elles soient stratégiques, de gestion ou techniques, ou encore le report provisoire d'autres décisions. La réalisation d'un dépôt final est en effet un processus progressif qui prendra plusieurs dizaines d'années et dont le bon déroulement sera conditionné par des décisions correctes au terme de différentes étapes charnières (fig. 2.2). Concrètement, les différentes possibilités en termes de formation-hôte et de site de dépôt devront donc rester ouvertes durant suffisamment longtemps et les différents aspects de l'installation, comme son architecture et le choix de ses matériaux constitutifs, devront pouvoir évoluer en fonction des connaissances. Une telle approche flexible ne se justifie toutefois que si la période correspondante est mise à profit pour optimiser le système de dépôt et pour mieux évaluer et, si nécessaire, diminuer davantage les risques qui y sont associés.

2.2.7 La faisabilité

L'installation de dépôt final étudiée doit bien entendu être faisable, à la fois en termes techniques et en termes économiques. La faisabilité technique est directement conditionnée par les exigences de sûreté minière et de sûreté radiologique opérationnelle, ainsi que par certaines exigences propres à l'Argile de Boom (voir section 2.3). La conception, la construction, l'exploitation et la fermeture de l'installation de dépôt doivent en outre autant que possible être basées sur les éléments suivants :

- des pratiques et des techniques d'ingénierie courantes et éprouvées ;
- un programme d'assurance de la qualité visant à garantir que l'installation de dépôt sera construite, exploitée et fermée comme prévu ;
- des évaluations itératives de la sûreté tenant compte de l'ensemble des développements scientifiques et technologiques ;
- des mécanismes de rétroaction entre les résultats des évaluations itératives et la conception, la construction, l'exploitation et la fermeture de l'installation de dépôt.

L'évaluation de la faisabilité technique s'appuie largement sur l'expérience pratique accumulée durant la construction du laboratoire souterrain HADES et se renforcera encore grâce à l'expérience PRACLAY qui, par son caractère de démonstration en vraie grandeur, inclut nécessairement des aspects de mise en œuvre (voir section 3.3.3). L'aspect « coûts », quant à lui, devra être évalué dans le cadre de l'optimisation du dépôt. Cette évaluation mettra en balance les différentes solutions envisageables pour augmenter la sûreté du dépôt par rapport aux augmentations de coût qu'elles entraîneraient.

2.2.8 La récupérabilité

Bien que la mise en dépôt final implique, par définition, qu'il n'y a pas d'intention de récupérer les déchets, il est possible de concevoir une installation de dépôt et de la mettre en œuvre de façon telle qu'il restera possible durant un certain temps aux générations futures d'y récupérer les déchets. L'importance de la récupérabilité s'étant du reste fortement affirmée au niveau international durant ces dernières années, il est possible qu'elle deviendra à terme une exigence légale en Belgique, comme c'est déjà le cas pour les déchets de catégorie A. Ceci étant, et quoique la récupérabilité n'ait jusqu'à présent pas été expressément prise en compte pour la conception de l'installation de dépôt, certains éléments de l'architecture de référence, comme le suremballage des colis de déchets vitrifiés, qui ont été introduits pour des motifs de sûreté, sont en réalité aussi des éléments de récupérabilité (voir section 3.3.1). La récupérabilité pourra également être facilitée en gardant les accès aux galeries de dépôt ouverts durant encore un certain temps après la fin de la mise en dépôt des déchets. Par contre, une fois que les accès auront été remblayés et scellés, la récupération des déchets deviendra beaucoup plus difficile, d'autant plus que l'installation souterraine, et en particulier le revêtement des voies d'accès, auront probablement été partiellement démantelés.

Bien entendu, l'exigence éventuelle de récupérabilité des déchets ne pourra en aucun cas hypothéquer la sûreté à long terme du système de dépôt. C'est notamment pourquoi la durée de sa phase opérationnelle, c'est-à-dire de la période qui s'étendra de la fin de la

Récupérabilité

Possibilité, pendant une période donnée, de récupérer de façon sûre les déchets mis en dépôt avec des moyens identiques ou comparables à ceux qui ont été utilisés pour leur mise en place. La récupérabilité est donc une des conséquences possibles de la flexibilité.

construction jusqu'à la fermeture, durant laquelle l'accès aux déchets sera relativement aisé, devra résulter d'un compromis entre l'impératif de sûreté d'une part et l'exigence de récupérabilité d'autre part.

2.3 Les exigences spécifiques à l'Argile de Boom

Pour le cas spécifique d'un dépôt final dans l'Argile de Boom, où le rôle de barrière de la formation-hôte est nettement prépondérant par rapport à celui des barrières ouvragées pour une évolution normale du système de dépôt (voir chapitre 4), toute installation de dépôt doit également remplir deux conditions essentielles.

- Elle doit être aussi peu étendue que possible dans sa dimension verticale et se situer autant que possible dans le plan médian de la formation-hôte, de manière à maximiser l'épaisseur d'argile qui peut servir de barrière.
- Elle doit perturber le moins possible les propriétés de l'argile environnante, de manière à ne pas nuire aux performances globales du système.

Les perturbations thermiques, chimiques, mécaniques ou encore hydrauliques induites dans la formation-hôte par la présence d'un dépôt ont deux origines principales. Les déchets mis en dépôt, dont certains émettent de grandes quantités de chaleur et de rayonnement, peuvent être à l'origine de la production de gaz ou modifier les caractéristiques du champ proche. La construction même du dépôt peut par ailleurs induire des perturbations mécaniques ainsi que des perturbations géochimiques. La minimisation de ces perturbations nécessite donc une bonne compréhension de la compatibilité entre les différents matériaux mis en présence et des différents phénomènes impliqués, particulièrement de ceux qui ont un impact sur les propriétés de migration de l'argile.

- *chaleur* La conception de l'architecture de dépôt doit être telle que l'augmentation de la température dans les champs proche et lointain à cause de la chaleur émise par les déchets de catégorie C ne mette pas en péril le pouvoir de confinement du système de dépôt. La production de chaleur entraînera en effet la dilatation de tous les composants de l'installation de dépôt, provoquant l'apparition de contraintes de déformation, voire la rupture de ceux qui ne pourront se dilater librement et pourrait modifier les propriétés de différents composants ouvragés du dépôt, notamment du matériau de remblayage. Elle pourrait par ailleurs altérer les propriétés de barrière de l'Argile de Boom (voir section 3.6).
- *rayonnements* La conception de l'architecture de dépôt doit aussi faire en sorte de limiter le risque de radiolyse de l'eau contenue dans l'Argile de Boom à cause des rayonnements émis par les colis de déchets. Cette influence sera toutefois faible en raison de la présence des matériaux du champ proche et, plus particulièrement, de la présence du matériau de remblayage. En outre, la quantité d'hydrogène produite par la radiolyse de l'eau présente dans ce dernier et dans l'Argile de Boom sera négligeable par rapport aux quantités de gaz qui peuvent être produites par corrosion et par biodégradation. L'impact des rayonnements sur la conception de l'installation se traduira donc principalement par des exigences dictées par la sûreté opérationnelle (voir section 3.6).

- *gaz* La conception de l'architecture de dépôt doit également tenir compte du problème de la production de gaz consécutive à la corrosion des métaux contenus dans les déchets, à la corrosion des différents types d'emballage et à celle des métaux éventuellement présents dans les matériaux de construction du dépôt. Si cette production de gaz est trop importante pour que le gaz puisse diffuser à travers l'argile, elle provoquera la formation d'une phase gazeuse et conduira à des surpressions locales susceptibles d'endommager l'argile et d'influencer la migration des radionucléides (voir section 3.6).
- *géochimie* Outre qu'elle devra contribuer à minimiser la radiolyse de l'eau interstitielle, la conception de l'installation de dépôt devra faire en sorte de perturber le moins possible les caractéristiques géochimiques du milieu de dépôt. Elle devra donc en particulier limiter l'apparition de fronts chimiques tels que le panache alcalin qui résulterait de l'utilisation de matrices de conditionnement ou de matériaux de construction à base de ciment, ou encore tels que le front de nitrate de sodium qui résulterait de la lixiviation de certains déchets bitumés. La construction et l'exploitation de l'installation de dépôt devront par ailleurs être conduites de façon à minimiser l'oxydation de la pyrite et de la matière organique contenues dans l'Argile de Boom, oxydation qui pourrait réduire sa capacité de rétention (voir section 3.6).
- *excavation* Enfin, les techniques d'excavation devront être choisies de façon à perturber le moins possible la formation argileuse. Elles devront donc notamment permettre de limiter la surexcavation et de maintenir la vitesse d'excavation au-dessus d'un seuil critique. L'espace excavé devra en outre être rapidement tapissé d'un revêtement destiné à contrer la forte convergence de la formation observée lors de la construction de l'installation souterraine existante et à assurer sa stabilité jusqu'au terme de la période d'exploitation et, le cas échéant, de la période de récupérabilité souhaitée (voir sections 3.3.2.1 et 3.6).

2.4 La gestion et l'assurance de la qualité

Une solution de dépôt final ne peut être sûre à court et à long terme et acceptable d'un point de vue socioéconomique si ses différents aspects, depuis les déchets à mettre en dépôt jusqu'à la fermeture du dépôt, en passant par sa conception, sa construction et son exploitation, ne possèdent pas les qualités requises, autrement dit, s'ils ne satisfont pas à des exigences prédéfinies. L'ONDRAF a donc entrepris de développer un programme de gestion et d'assurance de la qualité qui, à terme, deviendra un système global de gestion et d'assurance de la qualité s'étendant à tous les aspects du programme de mise en dépôt. Un des défis majeurs auxquels est confronté ce programme consiste à garantir la qualité et la traçabilité des données, modèles, décisions et hypothèses au moins jusqu'au terme de la période de contrôle institutionnel, ce qui nécessite leur archivage central systématique. Actuellement, il porte sur certains aspects de recherche et de développement et, en particulier, sur les évaluations de sûreté et sur la conception, ainsi que sur les phases de gestion précédant la mise en dépôt, soit principalement le traitement et le conditionnement des déchets et leur acceptation (voir chapitre 3). Il définit les normes à satisfaire, les moyens et procédures à mettre en œuvre pour qu'elles le soient effectivement ainsi que les contrôles à effectuer.

Le processus itératif de conception du dépôt final, qui repose sur l'interaction continue entre les aspects théoriques et expérimentaux de la recherche et du développement, prévoit, à la fin de chaque étape charnière, des évaluations de la qualité, c'est-à-dire des revues formelles critiques, systématiques et documentées des résultats et, en particulier, des résultats des évaluations de sûreté. Celles-ci jouent en effet un rôle central dans la conception, car elles aident à identifier les priorités de recherche et développement et à orienter le programme de travail. Leur qualité repose surtout sur les éléments suivants :

- la *qualité de l'information* relative au site de dépôt final, à l'architecture et aux barrières ouvragées (y compris aux déchets), qui est déterminée par la qualité du processus de détermination des objectifs de recherche, la qualité des méthodes utilisées pour collecter les données et la qualité de la documentation des données collectées ;
- la *qualité des méthodes* et modèles utilisés pour évaluer la sûreté sur base de ces informations, qui est en règle générale déterminée par le niveau de validité des simulations, lui-même conditionné par la qualité des modèles conceptuels développés, par la qualité des modèles mathématiques (qui sont la concrétisation numérique des modèles conceptuels) et par la qualité ou l'exactitude des valeurs des paramètres utilisés dans ces modèles.

L'assurance de la qualité de la recherche et développement repose notamment sur

- l'utilisation systématique de *data collection forms* comme interface entre la recherche et développement et les évaluations de sûreté à long terme, formulaires qui synthétisent notamment, pour chaque paramètre utilisé, sa définition, la meilleure estimation de sa valeur et sa distribution statistique ;
- le système de *gestion des connaissances* et de *traçabilité* qui sera développé progressivement, lequel devra garantir la pérennité des connaissances scientifiques et techniques acquises, en permettant l'inventaire exhaustif et systématique de tous les résultats, ainsi que garantir la traçabilité des hypothèses, choix et décisions ;
- l'*accréditation Beltest* progressive de laboratoires de recherche et développement du CEN-SCK, qui garantit notamment la conformité des travaux qui y sont effectués aux critères de la norme européenne NBN-EN-45001 ;
- les *coopérations internationales*, qui sont l'occasion de promouvoir une compréhension commune des difficultés rencontrées, d'établir des consensus sur les principes et méthodes à mettre en œuvre et d'effectuer des exercices de comparaison, notamment des codes et des banques de données ;
- l'*utilisation de modèles et de codes largement utilisés, testés et vérifiés* au niveau international, qui renforce la confiance dans la validité des résultats obtenus ;
- des *examens critiques réguliers par des spécialistes externes*, qui permettent de s'assurer de la qualité des résultats et des interprétations.

Pour les phases postérieures à la recherche et développement, seuls les grands principes du programme de gestion et d'assurance de la qualité ont actuellement été établis, en accord avec les recommandations internationales en la matière, tant générales (normes ISO) que spécifiques (recommandations de l'AIEA).