



ONDRAF

Organisme national des déchets radioactifs
et des matières fissiles enrichies

rapport

Aperçu technique du rapport SAFIR 2
(Safety Assessment and Feasibility Interim Report 2)

Version destinée au Conseil d'Administration de l'ONDRAF du 7 décembre 2001

NIROND 2001-05

Décembre 2001

1696



Aperçu technique du rapport SAFIR 2

(Safety Assessment and Feasibility Interim Report 2)

NIROND 2001- 05

Décembre 2001

Ce document a été rédigé 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 Hooft, 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

Ce document est également disponible en néerlandais sous le titre *Technisch overzicht van het SAFIR 2 rapport* et en anglais sous le titre *Technical overview of the SAFIR 2 report*.

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 l'approbation de sa publication par le Conseil d'administration de l'organisme, 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
1.1	La première phase de R&D méthodologique et le rapport SAFIR (1974–1989)	1.3
1.2	La deuxième phase de R&D méthodologique et le rapport safir 2 (1990–2000)	1.4
1.3	L'aperçu technique du rapport SAFIR 2	1.7
Chapitre 2	Assurer la sûreté et la faisabilité : les principes directeurs du développement d'un dépôt final en profondeur	2.1
2.1	Les objectifs d'un dépôt final en profondeur	2.5
2.2	Les exigences générales	2.6
2.2.1	La sûreté radiologique à long terme	2.7
2.2.2	La robustesse	2.12
2.2.3	La sûreté opérationnelle	2.13
2.2.4	La sous-criticité et le respect des <i>safeguards</i>	2.14
2.2.5	La protection de l'environnement	2.14
2.2.6	La flexibilité	2.14
2.2.7	La faisabilité	2.15
2.2.8	La récupérabilité	2.15
2.3	Les exigences spécifiques à l'Argile de Boom	2.16
2.4	La gestion et l'assurance de la qualité	2.17
Chapitre 3	Générer et organiser les connaissances : les acquis scientifiques et techniques	3.1
3.1	Les déchets conditionnés	3.4
3.1.1	La classification des déchets radioactifs conditionnés	3.4
3.1.2	L'inventaire des déchets conditionnés destinés au dépôt en profondeur	3.8
3.1.3	Les règles générales et les critères d'acceptation	3.10
3.2	La formation-hôte et l'environnement du système de dépôt	3.13
3.2.1	La sélection et le statut des formations-hôtes étudiées en Belgique	3.13
3.2.2	L'Argile de Boom comme formation-hôte	3.15
3.2.2.1	Caractérisation stratigraphique et lithologique	3.16
3.2.2.2	Caractérisation tectonique et sismique	3.24
3.2.2.3	Interprétation intégrée	3.26
3.2.3	L'hydrogéologie de l'Argile de Boom et de son environnement	3.27

3.2.3.1	Définition des unités hydrogéologiques	3.27
3.2.3.2	Evolutions piézométriques	3.29
3.2.3.3	Hydrogéochimie des aquifères	3.32
3.2.3.4	Caractérisation hydrodynamique	3.32
3.2.3.5	Perspectives	3.33
3.2.4	La modélisation hydrogéologique	3.34
3.2.4.1	Modèles mathématiques, méthodes de résolution et codes de calcul	3.36
3.2.4.2	Modèle régional	3.37
3.2.4.3	Modèle sub-régional	3.44
3.2.4.4	Modèle local	3.47
3.2.4.5	Perspectives et recommandations	3.47
3.3	L'installation de dépôt en profondeur	3.49
3.3.1	L'architecture de référence	3.49
3.3.2	Les différentes étapes opérationnelles d'un dépôt en profondeur	3.55
3.3.2.1	Construction	3.58
3.3.2.2	Exploitation	3.67
3.3.2.3	Fermeture	3.69
3.3.2.4	Contrôle institutionnel	3.70
3.3.3	Le projet de démonstration praclay	3.71
3.3.4	Les perspectives	3.73
3.4	Le comportement des déchets et des matériaux en conditions de dépôt	3.75
3.4.1	Le comportement des déchets conditionnés	3.75
3.4.1.1	Déchets vitrifiés	3.75
3.4.1.2	Combustibles usés	3.79
3.4.1.3	Gaines et embouts	3.81
3.4.1.4	Déchets bitumés	3.82
3.4.1.5	Déchets cimentés	3.84
3.4.1.6	Données sélectionnées pour la modélisation du champ proche	3.84
3.4.2	Le comportement des matériaux utilisés dans le dépôt en profondeur	3.84
3.4.2.1	Matériaux d'emballage et de suremballage	3.84
3.4.2.2	Matériaux de remblayage et de scellement	3.86
3.5	Le comportement des radionucléides dans l'Argile de Boom	3.89
3.5.1	Les caractéristiques de l'Argile de Boom en matière de migration	3.91
3.5.1.1	Dominance de la diffusion	3.91
3.5.1.2	Caractéristiques géochimiques	3.93
3.5.1.3	Interactions entre l'argile et les solutés	3.94
3.5.1.4	Présence de matière organique	3.94
3.5.2	Le comportement des radionucléides dans l'Argile de Boom	3.95
3.5.3	Les paramètres de migration	3.98
3.5.4	Le rôle de la matière organique	3.99
3.5.4.1	Capacité d'ultrafiltration de l'argile de Boom	3.99
3.5.4.2	Comportement de l'américium	3.100
3.5.4.3	Comportement de l'uranium, du neptunium et du plutonium	3.101

3.5.5	La variabilité des paramètres de migration sur l'épaisseur d'argile	3.101
3.5.6	Les données utilisées pour les évaluations de la sûreté à long terme	3.103
3.5.7	Les perspectives	3.104
3.6	Les perturbations induites dans l'Argile de Boom et son environnement	3.106
3.6.1	Les perturbations thermiques	3.106
3.6.1.1	Les études expérimentales	3.106
3.6.1.2	Implications pour la conception des installations de dépôt	3.108
3.6.1.3	Impact thermique du dépôt	3.108
3.6.2	Les perturbations induites par l'excavation	3.111
3.6.2.1	Caractérisation et modélisation géomécanique	3.111
3.6.2.2	La zone perturbée par l'excavation	3.113
3.6.3	Les perturbations induites par les gaz	3.114
3.6.3.1	La génération de gaz	3.114
3.6.3.2	Le transport du gaz	3.115
3.6.3.3	Les impacts sur l'Argile de Boom	3.117
3.6.4	Les perturbations induites par les rayonnements	3.117
3.6.5	Les perturbations géochimiques	3.118
3.6.5.1	Migration des toxiques chimiques	3.118
3.6.5.2	Migration des fronts chimiques	3.120
3.7	La modélisation de la biosphère	3.121
3.8	Les Argiles Yprésiennes comme formation-hôte alternative	3.124
3.8.1	Introduction	3.124
3.8.2	Le cadre géographique et géologique	3.125
3.8.3	Les caractéristiques des Argiles Yprésiennes à Doel	3.127
3.8.4	Les perspectives	3.128
Chapitre 4	Evaluer la sûreté radiologique à long terme : scénarios d'évolution normale et altérée	4.1
4.1	La méthodologie des évaluations de sûreté à long terme	4.4
4.1.1	Le développement des scénarios	4.4
4.1.2	L'évaluation des scénarios	4.6
4.2	Le développement des scénarios	4.8
4.2.1	L'identification des scénarios	4.9
4.2.2	La description des scénarios	4.10
4.2.2.1	Scénario d'évolution normale	4.11
4.2.2.2	Scénarios d'évolution altérée	4.15
4.3	L'évaluation des scénarios	4.17
4.3.1	Les arguments quantitatifs et qualitatifs	4.17
4.3.1.1	Indicateurs de sûreté classiques	4.18
4.3.1.2	Indicateurs de sûreté et de performance alternatifs	4.19
4.3.1.3	Arguments qualitatifs	4.20
4.3.2	L'évaluation du scénario d'évolution normale	4.20
4.3.2.1	Calculs de doses	4.20

4.3.2.2	Calculs d'indicateurs de sûreté et de performance alternatifs	4.36
4.3.3	L'évaluation des scénarios d'évolution altérée	4.38
4.3.4	Résultats et considérations complémentaires	4.40
4.4	La sous-criticité	4.45
4.5	Les perspectives	4.45
Chapitre 5	Evaluer les coûts : une méthodologie analytique, paramétrique et flexible	5.1
Chapitre 6	Conclusions et évaluation de la confiance acquise	6.1
6.1	Les principaux acquis	6.3
6.1.1	Connaissances acquises et questions ouvertes	6.3
6.1.2	Importance relative des incertitudes restantes	6.10
6.2	Eléments d'orientation pour le programme futur de recherche et développement méthodologique	6.15
6.2.1	Les axes principaux	6.16
6.2.2	Les éléments à considérer	6.17
6.2.3	Les prochaines étapes	6.22
6.3	L'évaluation de la confiance	6.25
Postface		P.1
Annexes		
A.1	Figures, tables et encadrés	A.1
A.2	Sigles, acronymes et noms propres	A.6
A.3	Lectures complémentaires	A.8
A.4	Table de correspondance avec le rapport safir 2	A.10
A.5	Avis final du comité de lecture du rapport safir 2	A.11

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, la gestion

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).

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 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)	1.3
1.2	La deuxième phase de R&D méthodologique et le rapport SAFIR 2 (1990–2000)	1.4
1.3	L'aperçu technique du rapport SAFIR 2	1.7

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 CEN-SCK pour la

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).

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.

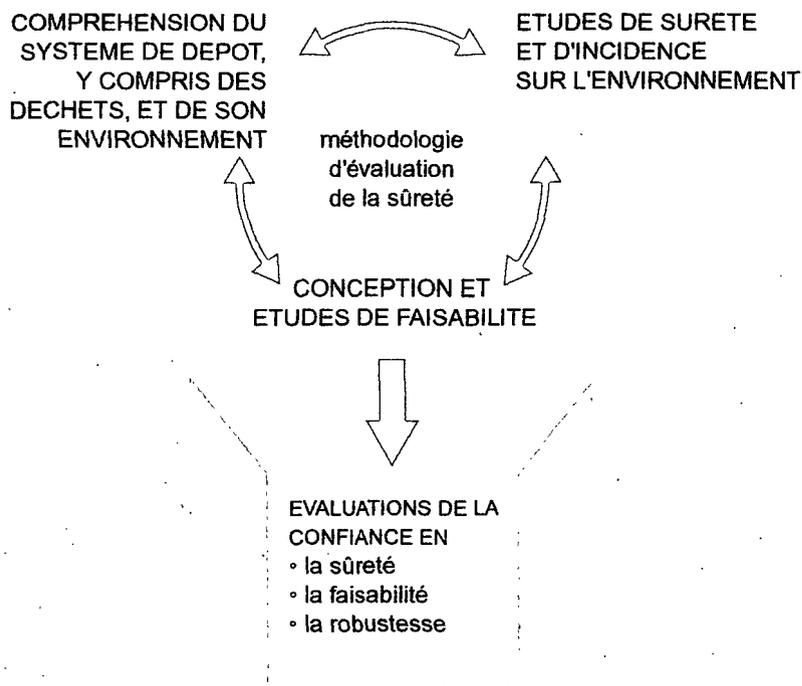
(La Belgique n'ayant pas, à ce jour, choisi de site de dépôt, l'emploi du terme « site » n'implique aucune notion de mise en œuvre.) Le programme de l'ONDRAF, qui est donc centré sur l'étude de l'Argile de Boom à l'aplomb de la zone nucléaire de Mol–Dessel, donnait en outre la priorité à l'étude de solutions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

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

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.

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 pour une description plus détaillée des principaux objectifs du programme de recherche et développement méthodologique de l'ONDRAF.)

itération n



itération n + 1

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

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.

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 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.

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.

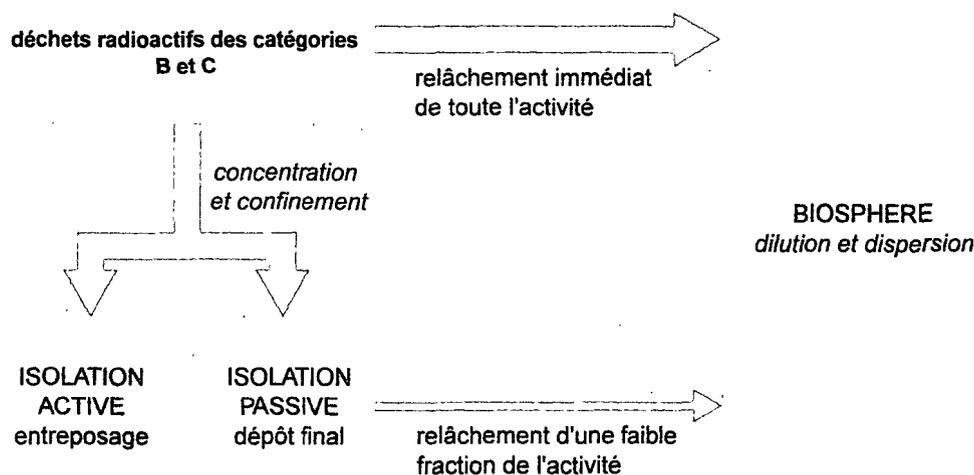


Figure 2.1 Les options envisageables pour la gestion à long terme des déchets radioactifs. L'option étudiée par l'ONDRAF pour la gestion des déchets des catégories B et C est celle de la concentration et du confinement par la voie d'une mise en dépôt final.

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.

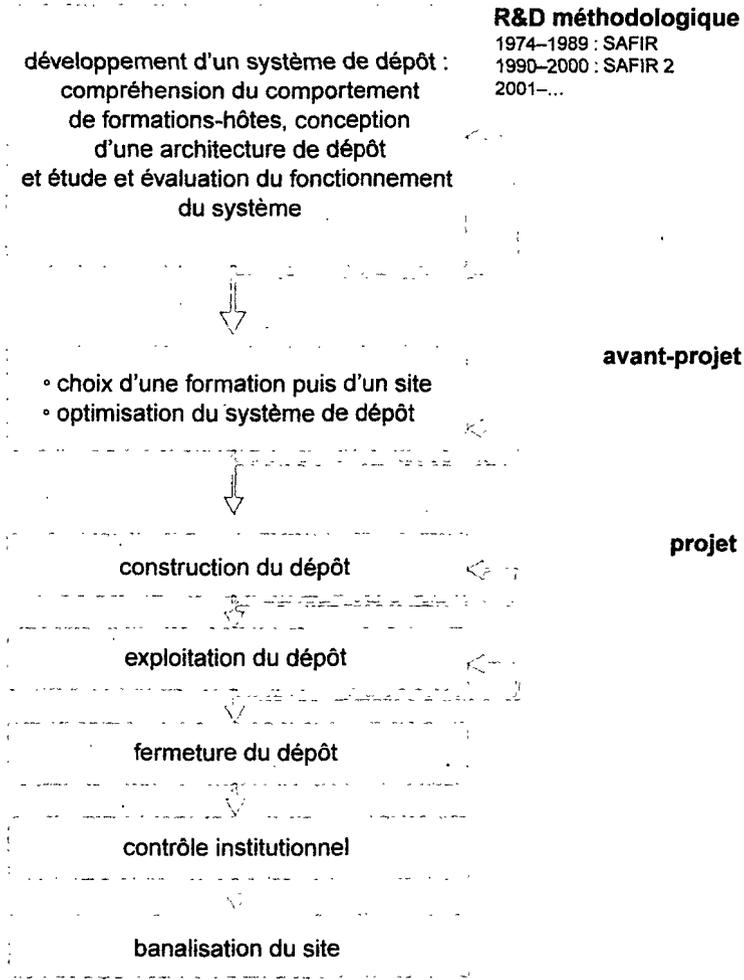


Figure 2.2 Les principales phases de la réalisation progressive d'un système de dépôt final. Cette réalisation se fait de manière flexible et itérative, les itérations pouvant entraîner des ajustements et, le cas échéant, des retours en arrière, à l'intérieur d'une même phase ou vers une phase antérieure (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.

2.4		
2.1	Les objectifs d'un dépôt final en profondeur	2.5
2.2	Les exigences générales	2.6
2.2.1	La sûreté radiologique à long terme	2.7
2.2.2	La robustesse	2.12
2.2.3	La sûreté opérationnelle	2.13
2.2.4	La sous-criticité et le respect des <i>safeguards</i>	2.13
2.2.5	La protection de l'environnement	2.14
2.2.6	La flexibilité	2.14
2.2.7	La faisabilité	2.14
2.2.8	La récupérabilité	2.15
2.3	Les exigences spécifiques à l'Argile de Boom	2.16
2.4	La gestion et l'assurance de la qualité	2.17

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), 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 absorbée

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

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 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 ».

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.

Dose moyenne	mSv/an	0	3.6
Radon	1.6		
Sol et bâtiments	0.4		
Cosmique	0.3		
Alimentation	0.3		
Applications médicales	0.95		
Autres activités	0.05		


 Sources naturelles
 Sources artificielles

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 radiolo-

gique 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 dispersion et de dilution ;
- 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 :

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 radio-nucléides 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 une installation de dépôt.

- *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 ;
- *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.

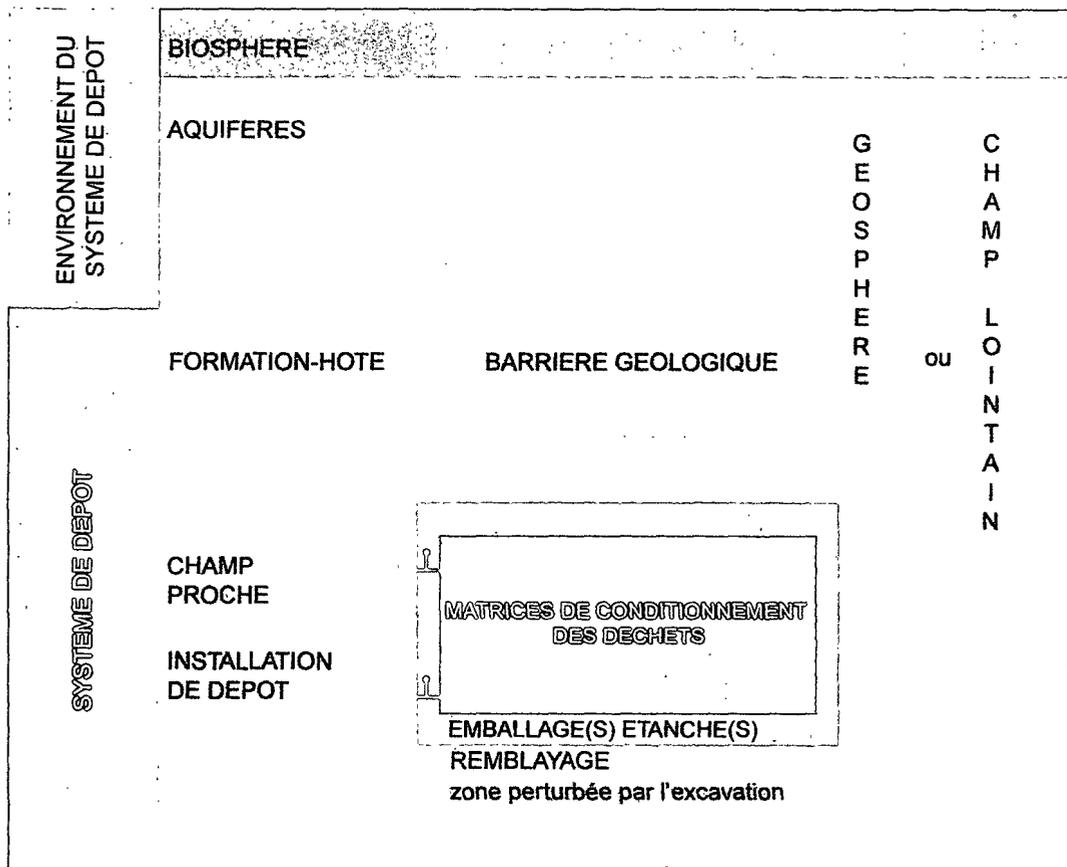


Figure 2.4 Schéma de principe d'une installation de dépôt final en profondeur et terminologie associée.

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.

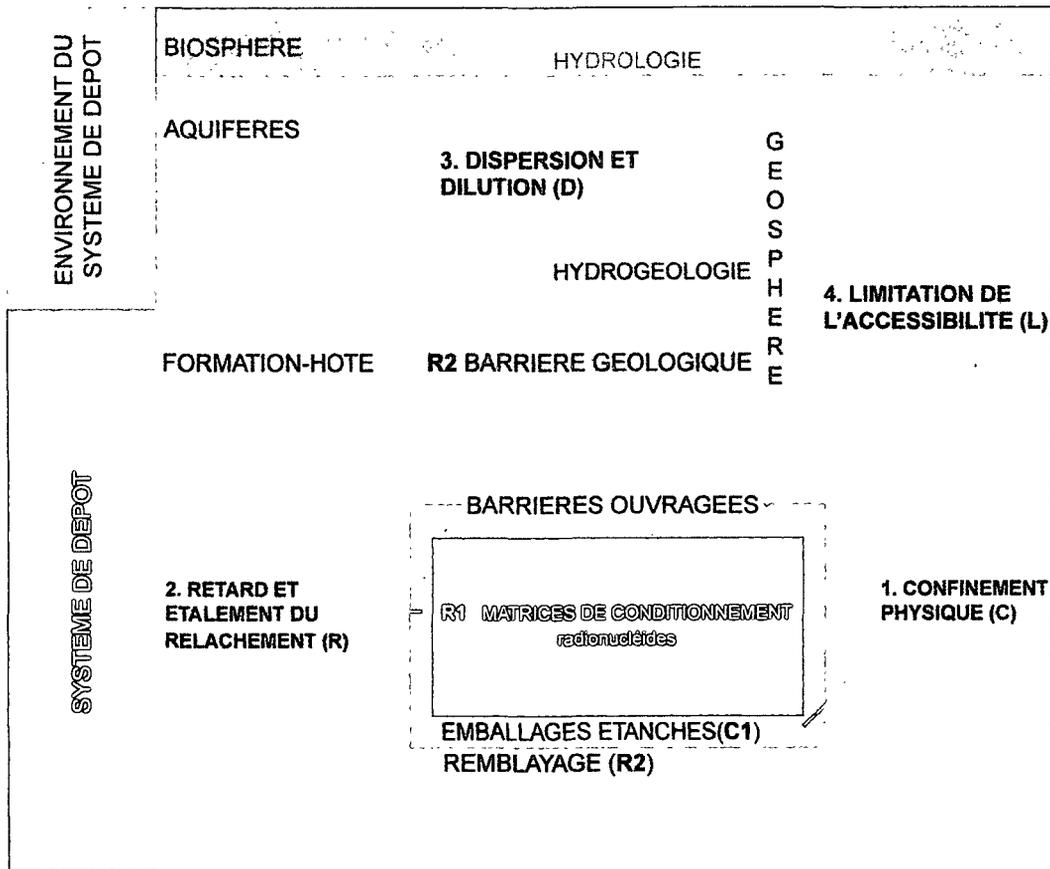


Figure 2.5 Les fonctions de sûreté à long terme du système de dépôt final en profondeur étudié qui sont considérées dans les évaluations de sûreté à long terme dans le cas du scénario d'évolution normale. Les différents composants du système peuvent assurer d'autres fonctions de sûreté non prises en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

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 :

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 par la formation-hôte et les aquifères qui l'entourent.

- 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 barrières assurant une fonction d'étanchéité, puis les radionucléides, entreront en contact avec l'eau infiltrée.

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 autocatrisant 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 avant tout 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 *dispersion et dilution 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

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.

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 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.

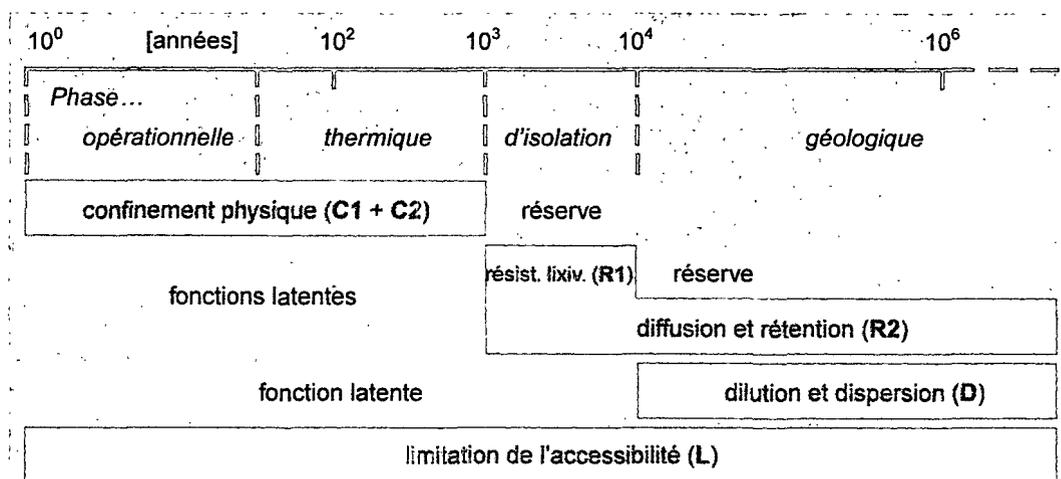


Figure 2.6 Les quatre phases de l'évolution normale d'un système de dépôt en profondeur pour les déchets de catégorie C les plus contraignants en termes radiologiques et thermiques, soit les déchets vitrifiés et les combustibles usés (voir section 3.1), et les fonctions de sûreté à long terme correspondantes.

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 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.

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

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

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.

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 sa construction jusqu'à sa 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 (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 différentes 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 sur-excavation 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 principalement sur les deux 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 les moyens suivants :

- 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 engrangés, 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).

3 Générer et organiser les connaissances : les acquis scientifiques et techniques

Le programme de recherche et développement méthodologique actuel de l'ONDRAF comprend fondamentalement deux grands volets : d'une part, le volet qui consiste à mener toutes les études et recherches nécessaires pour générer et organiser l'ensemble des connaissances scientifiques et techniques requises pour parvenir à *concevoir* et à *réaliser* une solution de dépôt en profondeur qui soit capable d'isoler de façon sûre à long terme les déchets radioactifs de la biosphère (l'objet du présent chapitre) ; d'autre part, le volet qui consiste à *évaluer* de façon indirecte la sûreté radiologique à long terme de la solution élaborée (l'objet du chapitre 4). Pour rappel, le programme de travail de l'ONDRAF s'articule autour de l'étude d'une formation-hôte de référence et d'un site de référence (l'Argile de Boom sous la zone nucléaire de Mol-Dessel) et n'a jusqu'ici abordé que de façon préliminaire l'étude d'une formation-hôte alternative (les Argiles Yprésiennes sous la zone nucléaire de Doel).

Le chapitre 3 synthétise les acquis scientifiques et techniques de la deuxième phase du programme de recherche et développement méthodologique de l'ONDRAF (1990–2000) en huit sections, que l'on peut relier à huit des questions que la conception d'une installation de dépôt final en profondeur ne manque pas de soulever.

- *Quels déchets sont destinés à être mis en dépôt en profondeur et quels volumes représentent-ils ? (section 3.1)*
- *Quelles sont les caractéristiques géologiques et hydrogéologiques de la formation-hôte de référence et comment s'effectuent les écoulements d'eau à travers et autour de cette formation ? (section 3.2 – Les caractéristiques géomécaniques de l'Argile de Boom sont traitées à la section 3.6.)*
- *Comment se présente l'installation de dépôt en profondeur étudiée et comment l'ONDRAF envisage-t-il de la construire, de l'exploiter et ensuite de la fermer ? (section 3.3)*
- *Quel comportement peut-on attendre des déchets mis en dépôt et des matériaux constitutifs de l'installation en conditions de dépôt ? (section 3.4)*
- *Par quels mécanismes les radionucléides contenus dans les déchets mis en dépôt sont-ils susceptibles de migrer dans l'argile ? (section 3.5)*
- *Quelles perturbations la construction de l'installation et les déchets mis en dépôt peuvent-ils entraîner dans la formation-hôte et dans quelle mesure faut-il les limiter ? (section 3.6, laquelle couvre également l'étude encore exploratoire de la migration des toxiques chimiques contenus dans les déchets mis en dépôt)*
- *Comment traiter le transfert dans la biosphère des radionucléides issus des déchets mis en dépôt ? (section 3.7)*
- *Quelles sont les principales caractéristiques de la formation-hôte alternative ? (section 3.8)*

3.2		
3.1	Les déchets conditionnés	3.4
3.1.1	La classification des déchets radioactifs conditionnés	3.4
3.1.2	L'inventaire des déchets conditionnés destinés au dépôt en profondeur	3.8
3.1.3	Les règles générales et les critères d'acceptation	3.10
3.2	La formation-hôte et l'environnement du système de dépôt	3.13
3.2.1	La sélection et le statut des formations-hôtes étudiées en Belgique	3.13
3.2.2	L'Argile de Boom comme formation-hôte	3.15
3.2.2.1	Caractérisation stratigraphique et lithologique	3.16
3.2.2.2	Caractérisation tectonique et sismique	3.24
3.2.2.3	Interprétation intégrée	3.26
3.2.3	L'hydrogéologie de l'Argile de Boom et de son environnement	3.27
3.2.3.1	Définition des unités hydrogéologiques	3.27
3.2.3.2	Evolutions piézométriques	3.29
3.2.3.3	Hydrogéochimie des aquifères	3.32
3.2.3.4	Caractérisation hydrodynamique	3.32
3.2.3.5	Perspectives	3.33
3.2.4	La modélisation hydrogéologique	3.34
3.2.4.1	Modèles mathématiques, méthodes de résolution et codes de calcul	3.36
3.2.4.2	Modèle régional	3.37
3.2.4.3	Modèle sub-régional	3.44
3.2.4.4	Modèle local	3.47
3.2.4.5	Perspectives et recommandations	3.47
3.3	L'installation de dépôt en profondeur	3.49
3.3.1	L'architecture de référence	3.49
3.3.2	Les différentes étapes opérationnelles d'un dépôt en profondeur	3.55
3.3.2.1	Construction	3.58
3.3.2.2	Exploitation	3.67
3.3.2.3	Fermeture	3.69
3.3.2.4	Contrôle institutionnel	3.70
3.3.3	Le projet de démonstration PRACLAY	3.71
3.3.4	Les perspectives	3.73
3.4	Le comportement des déchets et des matériaux en conditions de dépôt	3.75
3.4.1	Le comportement des déchets conditionnés	3.75
3.4.1.1	Déchets vitrifiés	3.75
3.4.1.2	Combustibles usés	3.79
3.4.1.3	Gaines et embouts	3.81
3.4.1.4	Déchets bitumés	3.82
3.4.1.5	Déchets cimentés	3.84
3.4.1.6	Données sélectionnées pour la modélisation du champ proche	3.84
3.4.2	Le comportement des matériaux utilisés dans le dépôt en profondeur	3.84
3.4.2.1	Matériaux d'emballage et de suremballage	3.84

	3.4.2.2 Matériaux de remblayage et de scellement	3.86
3.5	Le comportement des radionucléides dans l'Argile de Boom	3.89
	3.5.1 Les caractéristiques de l'Argile de Boom en matière de migration	3.91
	3.5.1.1 Dominance de la diffusion	3.91
	3.5.1.2 Caractéristiques géochimiques	3.93
	3.5.1.3 Interactions entre l'argile et les solutés	3.94
	3.5.1.4 Présence de matière organique	3.94
	3.5.2 Le comportement des radionucléides dans l'Argile de Boom	3.95
	3.5.3 Les paramètres de migration	3.98
	3.5.4 Le rôle de la matière organique	3.99
	3.5.4.1 Capacité d'ultrafiltration de l'Argile de Boom	3.99
	3.5.4.2 Comportement de l'américium	3.100
	3.5.4.3 Comportement de l'uranium, du neptunium et du plutonium	3.101
	3.5.5 La variabilité des paramètres de migration sur l'épaisseur d'argile	3.101
	3.5.6 Les données utilisées pour les évaluations de la sûreté à long terme	3.103
	3.5.7 Les perspectives	3.104
3.6	Les perturbations induites dans l'Argile de Boom et son environnement	3.106
	3.6.1 Les perturbations thermiques	3.106
	3.6.1.1 Les études expérimentales	3.106
	3.6.1.2 Implications pour la conception des installations de dépôt	3.108
	3.6.1.3 Impact thermique du dépôt	3.108
	3.6.2 Les perturbations induites par l'excavation	3.111
	3.6.2.1 Caractérisation et modélisation géomécanique	3.111
	3.6.2.2 La zone perturbée par l'excavation	3.113
	3.6.3 Les perturbations induites par les gaz	3.114
	3.6.3.1 La génération de gaz	3.114
	3.6.3.2 Le transport du gaz	3.115
	3.6.3.3 Les impacts sur l'Argile de Boom	3.117
	3.6.4 Les perturbations induites par les rayonnements	3.117
	3.6.5 Les perturbations géochimiques	3.118
	3.6.5.1 Migration des toxiques chimiques	3.118
	3.6.5.2 Migration des fronts chimiques	3.120
3.7	La modélisation de la biosphère	3.121
3.8	Les Argiles Yprésiennes comme formation-hôte alternative	3.124
	3.8.1 Introduction	3.124
	3.8.2 Le cadre géographique et géologique	3.125
	3.8.3 Les caractéristiques des Argiles Yprésiennes à Doel	3.127
	3.8.4 Les perspectives	3.128

3.1 Les déchets conditionnés

Pour pouvoir faire l'objet d'une gestion à long terme adéquate, tous les déchets radioactifs doivent satisfaire à plusieurs pré-requis, qui peuvent se résumer comme suit. Ils doivent

- être chimiquement inertes et être manipulables, et doivent donc avoir été conditionnés sous forme solide ;
- être suffisamment bien connus d'un point de vue radiologique, afin que la sûreté radiologique de l'installation de dépôt qui les abritera puisse être évaluée ;
- satisfaire à divers critères de qualité destinés à assurer qu'ils ne mettront pas le bon fonctionnement du système de dépôt en péril ;
- avoir fait l'objet d'études suffisantes quant à leur mode de dégradation en conditions de dépôt.

Bien entendu, la diversité de leurs caractéristiques radiologiques a nécessité la mise au point d'un système de classification adéquat.

3.1.1 La classification des déchets radioactifs conditionnés

Afin de faciliter leur gestion sûre à court et à long terme, les déchets radioactifs, qui présentent des caractéristiques extrêmement variées, sont regroupés en différents ensembles, selon les similitudes qu'ils présentent. Les systèmes de classification utilisés à l'échelle internationale, ceux de l'AIEA et de l'Union européenne, ne font pas de distinction entre les déchets radioactifs conditionnés et non conditionnés. Ils comptent deux niveaux : le niveau des groupes et celui des catégories, qui répartit les déchets selon leur niveau d'activité et leur durée de vie (table 3.1).

Table 3.1 Les caractéristiques des trois catégories de déchets radioactifs selon la classification internationale.

	Faible activité	Moyenne activité	Haute activité
Courte durée de vie (30 ans ou moins)	A	A	C
Longue durée de vie (plus de 30 ans)	B	B	C

Les pays confrontés à la gestion de déchets radioactifs ont toutefois développé leur propre classification, plus détaillée et adaptée à leur mode de gestion. C'est ainsi qu'en Belgique, l'ONDRAF a adopté en 1997 pour les déchets radioactifs conditionnés une classification pyramidale en quatre niveaux, compatible avec les grandes classifications internationales, et qui se prête à être adaptée, le cas échéant, aux évolutions que pourrait connaître la gestion de ces déchets. Cette classification, qui se base sur les caractéristiques des déchets au moment de leur conditionnement, constitue un acquis non négligeable depuis la rédaction du rapport SAFIR et un apport important à leur gestion technique, administrative et financière (fig. 3.1).

Les groupes de déchets radioactifs conditionnés, au nombre de deux, sont définis en fonction du nombre des solutions possibles de mise en dépôt final pour les déchets en question.

- Le groupe *géologique*, auquel est consacré le rapport SAFIR 2, rassemble les déchets radioactifs conditionnés dont les caractéristiques radiologiques, c'est-à-dire les concentrations d'activité des radionucléides qu'ils contiennent et leur durée de vie, rendent impératif leur isolement permanent de la biosphère. Cet isolement permanent, qui constitue donc la seule solution envisageable pour leur gestion à long terme, est actuellement jugé réalisable via la mise en dépôt en couches géologiques profondes et stables.
- Le groupe *ouvert*, qui n'est pas considéré dans le rapport SAFIR 2, rassemble les déchets radioactifs conditionnés dont les caractéristiques radiologiques ont des valeurs suffisamment faibles pour permettre d'envisager des solutions alternatives à l'isolement géologique, car leur niveau d'activité atteindra par décroissance naturelle une valeur insignifiante dans un laps de temps compatible avec les possibilités de contrôle, soit un laps de temps de 200 à 300 ans maximum.

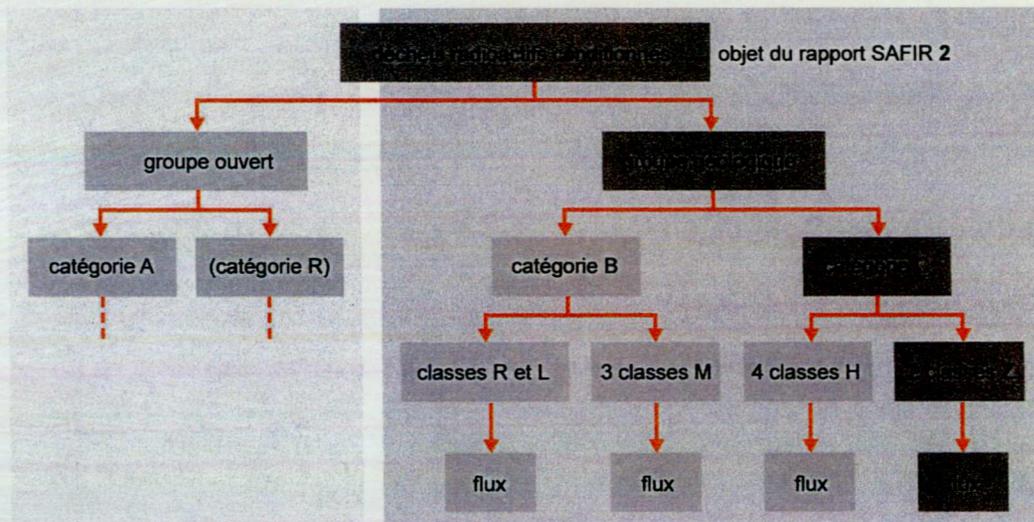


Figure 3.1 La classification des déchets radioactifs conditionnés en Belgique. Le rapport SAFIR 2 concerne tous les déchets du groupe géologique, mais développe plus particulièrement la question de la gestion à long terme des déchets vitrifiés de très haute activité et des combustibles usés non retraités, soit les déchets des classes ZAGALC et ZAGALS respectivement, qui sont les classes les plus exigeantes des points de vue radiologique et thermique.

Les trois **catégories** principales de déchets radioactifs conditionnés sont définies par un critère radiologique et un critère de puissance thermique. La catégorie A appartient au groupe ouvert et les catégories B et C au groupe géologique. Plus récente et plus spécifique, la catégorie R, qui n'a pas d'équivalent au niveau international, est provisoirement rattachée au groupe ouvert.

- Les déchets de *catégorie A* sont ceux dont les radionucléides qu'ils contiennent présentent des activités spécifiques et des durées de vie suffisamment faibles pour pouvoir être mis en dépôt en surface, soit maximum 400 à $4000 \text{ Bq}\cdot\text{g}^{-1}$ d'activité alpha selon les recommandations génériques de l'AIEA et de l'Union européenne.

- Les déchets de *catégorie B* sont ceux qui ne respectent pas le critère d'appartenance à la catégorie A mais génèrent trop peu de chaleur pour appartenir à la catégorie C.
- Les déchets de *catégorie C* contiennent de très grandes quantités d'émetteurs alpha et bêta et génèrent une puissance thermique supérieure à $20 \text{ W}\cdot\text{m}^{-3}$, valeur qui marque la limite entre les catégories B et C dans le cas d'une solution de dépôt dans l'argile. Ils doivent donc pouvoir se refroidir durant une période d'entreposage et leur puissance thermique résiduelle au seuil de leur mise en dépôt final impose, soit de réduire le nombre de colis par mètre courant de galerie de dépôt, soit d'espacer les galeries.
- Les déchets de *catégorie R*, enfin, regroupent les déchets légèrement contaminés au radium entreposés sur le site de l'ancienne raffinerie d'Olen de l'Union Minière et dont le sort est actuellement incertain.

Les vingt classes de déchets sont définies en fonction du type d'entreposage et du type de dépôt final auxquels sont destinés les colis, ainsi parfois qu'en fonction de leur provenance ou de leurs caractéristiques techniques. Les déchets radioactifs destinés au dépôt en profondeur, qui proviennent pour la plupart d'opérations liées au cycle du combustible, sont répartis en 11 classes (table 3.2).

- Les déchets de *classe Z* (catégorie C, très haute activité, hautement calorifiques) proviennent du cycle du combustible nucléaire. La classe ZAGALC est formée des *déchets vitrifiés* de très haute activité issus du retraitement par la société française COGEMA des combustibles usés commerciaux (produits de fission et d'activation et actinides mineurs, effluents liquides). La classe ZAGALS apparaîtra en cas d'abandon de l'option du retraitement par la Belgique et sera formée des assemblages de *combustible usé* commerciaux eux-mêmes. Tous ces déchets produisent initialement une grande quantité de chaleur, essentiellement due à la décroissance radioactive du ^{90}Sr et du ^{137}Cs dans le cas des déchets de la classe ZAGALC et à la décroissance radioactive du ^{241}Pu et de ^{241}Am dans le cas de ceux de la classe ZAGALS. Cette émission de chaleur oblige, en tout cas dans l'optique d'un dépôt en profondeur dans l'argile, à laisser d'abord refroidir les déchets quelque temps en surface, sous peine d'entamer le pouvoir de confinement de celle-ci. La puissance calorifique linéique des déchets de la classe ZAGALC s'élève à $378 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}$ après la période d'entreposage actuellement considérée, qui est de 50 ans à compter du déchargement du réacteur, mais qui pourrait être portée à 60 ans.
- Les déchets de *classe H* (catégorie C, haute activité, moyennement calorifiques) proviennent du retraitement de combustibles usés. La classe HAGALC2 est formée des matériaux de structure (*coques, embouts, ressorts, etc.*) des assemblages de combustible usé retraité par COGEMA et de déchets dits « technologiques », c'est-à-dire essentiellement des pièces d'équipement et des instruments de laboratoire. Tous ces déchets sont compactés. Les trois classes HAGALP, elles, résultent de la vitrification et, pour une faible partie d'entre eux, de la cimentation par Belgoprocess dans PAMELA de déchets de retraitement produits par Eurochemic entre 1966 et 1974.

Table 3.2 Inventaire des déchets radioactifs destinés au dépôt en profondeur. Les chiffres en romain dans la colonne « Nb de colis attendus » correspondent au scénario de retraitement complet et sont à remplacer par ceux en *italique* pour le scénario de mise en dépôt direct (estimations de 1999). Les activités, doses et puissances données sont celles au moment du conditionnement.

Catégorie et activité	Classe	Principaux flux de déchets	Matrice	Nb de colis attendus	Vol. ext. / colis [m ³]	Activité [Bq·colis ⁻¹]		Dose au contact [Sv·h ⁻¹]	Puissance [W·colis ⁻¹]
						α	$\beta\gamma$		
C très haute activité	ZAGALC	Déchets de retraitement	verre	3915 / 420	0.180	1.3·10 ¹⁴	9.1·10 ¹⁵	> 10 ⁴	602
	ZAGALS	Combustibles usés : UO ₂ (Doel 1 et 2)	UO ₂ *	1669	0.326	1.7·10 ¹⁴	1.5·10 ¹⁵	~10 ³	188
		UO ₂ (Tihange 1 et 2 / Doel 3)	UO ₂ *	4780	0.444				
		UO ₂ (Tihange 3 / Doel 4)	UO ₂ *	3266	0.517				
	MOX : UO ₂ / PuO ₂ (Tihange 2 / Doel 3)	UO ₂ /PuO ₂ *	144	0.444	9.9·10 ¹⁴	2.3·10 ¹⁵	~10 ³	905	
C haute activité	HAGALC2	Déchets de structure et déchets technologiques compactés	-	6410 / 820	0.180	7.9·10 ¹¹	1.7·10 ¹⁴	> 2	20
	HAGALP1	Déchets liquides de retraitement de l'ex-Eurochemic	verre	1501**	0.070	8.2·10 ¹¹	1.3·10 ¹⁴	> 2	5
	HAGALP2	Déchets liquides de retraitement de l'ex-Eurochemic	verre	700**	0.195	2.6·10 ¹¹	7.1·10 ¹³		2
	HAGALP3	Déchets solides de retraitement de l'ex-Eurochemic	ciment	160**	0.195	6.0·10 ¹¹	3.6·10 ¹³		3
Total des déchets de catégorie C				12686 / 13460	2132 / 4642 m³				
B moyenne activité	MAGALC	Déchets de retraitement (boues de coprécipitation)	bitume	480*	0.238	1.8·10 ¹⁰	2.6·10 ¹²	0.750 à 2	0.1
	MAGALE	Déchets liquides et solides de l'ex-Eurochemic	bitume	13406	0.245	2.0·10 ¹⁰	2.6·10 ¹²	0.005 à 2	0.1
	MAGAL	Déchets secondaires de PAMELA et de son démantèlement	ciment	186	0.245	8.6·10 ⁹	2.2·10 ¹²	0.005 à 2	0.2
		Déchets du HRA/Solarium	ciment	1200	0.500	pm	pm		pm
		Déchets du HRA/Solarium	ciment	142	2.500	pm	pm		pm
		Déchets de démantèlement des réacteurs industriels	ciment	2075	0.500	pm	1.1·10 ¹⁵		176
	Déchets de démantèlement des réacteurs du CEN·SCK	ciment	67	0.500	5.1·10 ⁵	2.6·10 ¹³	2		
B faible activité	LAGAL	Déchets de production courante de MOX	ciment	1459	0.500	4.6·10 ¹¹	1.0·10 ¹³	< 0.005	0.4
		Déchets de démantèlement des installations MOX	ciment	1901		2.7·10 ¹⁰	2.7·10 ¹¹		0.02
		Déchets de démantèlement de l'ex-Eurochemic	ciment	642		3.5·10 ¹¹	1.2·10 ⁹		0.3
		Déchets divers de l'ex-département Waste	ciment	170		1.7·10 ¹¹	3.3·10 ¹²		0.2
	RAGAL	Déchets contaminés au radium	pm	pm	pm	pm	pm	0.005 à 2	pm
TOTAL DES DECHETS DE CATEGORIE B				21728	7556 m³				

• : le matériau utilisé pour remplir les emballages étanches est le sable ; ** : production terminée

- Les déchets de *classe M* (catégorie B, moyenne activité, faiblement calorifiques) ont des origines plus variées que les déchets des classes Z et H. La classe MAGALC est formée de boues bitumées issues du retraitement de combustibles usés par COGEMA. La classe MAGALE est formée de déchets divers bitumés, principalement des déchets liquides de retraitement d'Eurochemic (déchets Eurobitum). Enfin, la classe générique MAGAL est constituée de colis dont le débit de dose au contact est supérieur à $5 \text{ mSv}\cdot\text{h}^{-1}$. Elle regroupe essentiellement des déchets issus de la recherche effectuée par le CEN-SCK avant 1989 et des déchets de démantèlement, tous cimentés dans l'installation PAMELA.
- Les déchets des *classes génériques L et R* (catégorie B, faible activité, faiblement calorifiques, longue durée de vie) ont un débit de dose au contact inférieur ou égal à $5 \text{ mSv}\cdot\text{h}^{-1}$. La classe LAGAL regroupe essentiellement des déchets issus de la production courante du combustible MOX, des déchets issus des passifs nucléaires et des déchets de démantèlement contenant de grandes quantités d'émetteurs alpha, tous cimentés. La classe RAGAL, enfin, regroupe tous les déchets contaminés au radium issus de façon indirecte des activités de production de radium de l'ancienne usine d'Olen et du programme actinium du CEN-SCK. (Elle ne comprend donc pas les déchets de la catégorie R.)

Enfin, les flux (plus de cent) répartissent les déchets en autant d'ensembles de colis de caractéristiques physiques, chimiques et radiologiques homogènes, issus du conditionnement par un même procédé de déchets bruts de même nature.

3.1.2 L'inventaire des déchets conditionnés destinés au dépôt en profondeur

Les principales réalisations en matière d'inventaire sont l'élaboration de prévisions de production de déchets, ainsi que l'acquisition et le regroupement systématique et cohérent d'une grande quantité de données sur ces déchets, notamment en matière de contenu radiologique qualitatif (les radionucléides) et quantitatif (les activités spécifiques respectives) (tables 3.2 et 3.3).

Contrairement à l'inventaire donné dans le rapport SAFIR, qui supposait le retraitement de l'ensemble des combustibles usés, l'inventaire donné dans le rapport SAFIR 2, qui date de 1999, considère deux scénarios distincts : un scénario de retraitement complet de l'ensemble des combustibles usés et un scénario de mise en dépôt direct des combustibles usés non retraités. Ces deux scénarios se basent sur des hypothèses identiques en ce qui concerne les combustibles consommés ou à consommer :

- les sept réacteurs nucléaires commerciaux belges, qui représentent une puissance totale installée de 5.7 GWe, seront arrêtés après une période d'exploitation de 40 ans chacun ;
- l'enrichissement initial en ^{235}U des combustibles uranium est de 4.0 % et celui en $^{239}\text{Pu} + ^{241}\text{Pu}$ des combustibles à oxydes mixtes (MOX) est de 4.93 % ;
- les combustibles sont irradiés durant 1 450 jours et leur taux de combustion de référence est de $45 \text{ GWj}\cdot\text{tHM}^{-1}$, soit $45\cdot 10^9$ watt-jour par tonne de métal lourd (uranium ou MOX).

Ces hypothèses permettent d'estimer à 4 860 tHM la consommation totale de combustible conventionnel à l'uranium, à laquelle il faut ajouter environ 70 tHM de combustible MOX. Les inventaires totaux correspondant aux deux scénarios sont donc les suivants :

- *Scénario de retraitement complet* : retraitement intégral des 4 860 tU. Ce scénario entraîne la production de 3 920 conteneurs de déchets vitrifiés de très haute activité (déchets de la classe ZAGALC) et 6 410 conteneurs de déchets de structure des assemblages de combustible usé (déchets de la classe HAGALC2), auxquels s'ajoutent quelque 70 tHM MOX existantes.
- *Scénario de mise en dépôt direct* : arrêt du retraitement après le retraitement des 630 tU correspondant aux contrats existants. Ce scénario entraîne la production de 420 conteneurs de déchets vitrifiés de très haute activité et 820 conteneurs de déchets de structure des assemblages de combustible usé, auxquels s'ajoutent environ 4 230 tU non retraité et les quelque 70 tHM MOX existantes.

Les prévisions de production des déchets à partir des deux scénarios et des informations relatives aux différents autres flux de déchets révèlent une forte diminution du volume des déchets destinés au dépôt en profondeur. Alors que, dans le rapport SAFIR, ce volume était d'environ 27 000 m³, il n'est plus que d'environ 10 000 m³ pour le scénario de retraitement complet et d'environ 12 500 m³ pour le scénario de mise en dépôt direct. Le rapport SAFIR 2 prend par ailleurs en compte de nouveaux types de déchets et en voit disparaître d'autres, en raison de l'évolution des procédés de conditionnement.

Bien que les évaluations relatives à la sûreté radiologique à long terme du dépôt en profondeur révèlent un niveau de sûreté adéquat et peu sensible aux inventaires utilisés (voir section 4.3.2), ces résultats doivent encore être confirmés. Cette confirmation repose notamment sur une meilleure connaissance des déchets à mettre en dépôt et nécessite donc entre autres les quatre types d'action suivants :

- préciser, sur base d'informations disponibles, chez les producteurs notamment, l'inventaire en radionucléides critiques des différentes classes de déchets, les propriétés physiques de ces déchets (en particulier le dégagement de chaleur) et leurs caractéristiques chimiques (notamment la présence de métaux lourds et d'autres éléments chimio-toxiques) ;
- améliorer, dans le cadre d'un système de gestion et d'assurance de la qualité transparent, la documentation des connaissances relatives à l'inventaire des déchets, afin qu'il soit possible de retrouver plus aisément les hypothèses et les codes de calcul utilisés, ou encore les mesures effectuées (voir section 2.4) ;
- affiner les scénarios de production des déchets, sur base d'une description plus détaillée du cycle du combustible nucléaire et des diverses évolutions envisageables de ce dernier ;
- étudier les possibilités de vérifier les caractéristiques fondamentales des déchets avant leur mise en dépôt final.

Table 3.3 Inventaire, en becquerels par colis, des radionucléides considérés dans les évaluations de sûreté à long terme pour les déchets les plus contraignants en termes radiologiques et thermiques (voir aussi section 4.3.2.1). (Pour les évaluations de sûreté, l'inventaire en ^{36}Cl a été estimé à partir de données étrangères. Par ailleurs, bien que le ^{59}Ni , le ^{94}Nb et le ^{147}Sm aient des durées de vie qui imposent a priori de les prendre en compte dans les évaluations de sûreté, la radiotoxicité intrinsèque très faible du premier en fait un radionucléide non critique et les deux autres ont, selon ces mêmes évaluations, un impact radiologique négligeable. Ils ne sont donc pas repris ci-dessous.)

	^{14}C	^{79}Se	^{93}Zr	^{99}Tc	^{107}Pd	^{126}Sn	^{129}I	^{135}Cs
Déchets vitrifiés	–	$1.7 \cdot 10^{10}$	$9.1 \cdot 10^{10}$	$7.1 \cdot 10^{11}$	$5.2 \cdot 10^9$	$2.9 \cdot 10^{10}$	$1.5 \cdot 10^8$	$2.3 \cdot 10^{10}$
Combustible UOX	$8.9 \cdot 10^9$	$9.4 \cdot 10^9$	$4.5 \cdot 10^{10}$	$2.9 \cdot 10^{11}$	$2.9 \cdot 10^9$	$1.8 \cdot 10^{10}$	$7.4 \cdot 10^8$	$1.0 \cdot 10^{10}$
Combustible MOX	$4.3 \cdot 10^9$	$8.0 \cdot 10^9$	$3.3 \cdot 10^{10}$	$2.8 \cdot 10^{11}$	$5.9 \cdot 10^9$	$2.5 \cdot 10^{10}$	$9.2 \cdot 10^8$	$9.4 \cdot 10^9$
Coques et embouts	$5.0 \cdot 10^7$	$3.9 \cdot 10^7$	$5.6 \cdot 10^9$	$4.0 \cdot 10^9$	–	–	$5.6 \cdot 10^7$	$2.0 \cdot 10^8$
	^{226}Ra	^{228}Th	^{230}Th	^{231}Pa	^{232}Th	^{233}U	^{234}U	^{235}U
Déchets vitrifiés	–	$1.8 \cdot 10^3$	$3.8 \cdot 10^4$	$1.4 \cdot 10^5$	$3.1 \cdot 10^0$	$8.6 \cdot 10^1$	$6.3 \cdot 10^5$	$3.9 \cdot 10^5$
Combustible UOX	$4.9 \cdot 10^5$	$3.1 \cdot 10^3$	$2.5 \cdot 10^6$	$8.4 \cdot 10^5$	$1.4 \cdot 10^1$	$1.9 \cdot 10^6$	$1.0 \cdot 10^{10}$	$2.6 \cdot 10^8$
Combustible MOX	$1.0 \cdot 10^6$	$1.8 \cdot 10^4$	$1.1 \cdot 10^7$	$2.2 \cdot 10^5$	$9.3 \cdot 10^5$	$4.4 \cdot 10^{10}$	$4.4 \cdot 10^{10}$	$4.1 \cdot 10^7$
Coques et embouts	–	–	–	–	–	–	–	–
	^{236}U	^{237}Np	^{238}U	^{242}Pu	^{244}Pu	^{248}Cm		
Déchets vitrifiés	$4.7 \cdot 10^6$	$1.5 \cdot 10^{10}$	$5.5 \cdot 10^9$	$8.0 \cdot 10^7$	$4.3 \cdot 10^0$	$3.7 \cdot 10^4$		
Combustible UOX	$5.6 \cdot 10^9$	$9.1 \cdot 10^9$	$5.4 \cdot 10^9$	$5.1 \cdot 10^{10}$	$1.2 \cdot 10^4$	$1.5 \cdot 10^4$		
Combustible MOX	$3.9 \cdot 10^8$	$7.3 \cdot 10^9$	$5.2 \cdot 10^9$	$2.4 \cdot 10^{11}$	$7.8 \cdot 10^5$	$1.1 \cdot 10^5$		
Coques et embouts	–	$5.0 \cdot 10^6$	–	$5.3 \cdot 10^{10}$	–	–		

3.1.3 Les règles générales et les critères d'acceptation

Pour pouvoir assurer une gestion sûre à court et à long terme des déchets radioactifs qui lui sont confiés, l'ONDRAF doit être suffisamment sûr que leurs caractéristiques intrinsèques ne risquent en principe pas de mettre en péril la sûreté d'une ou de plusieurs des étapes de leur gestion, et donc recevoir l'assurance qu'elles sont conformes à différents critères qu'il a préalablement établis. Conformément aux dispositions de l'arrêté royal du 30 mars 1981 modifiées par celles de l'arrêté royal du 16 octobre 1991, il a donc établi les règles générales devant servir de cadre de référence pour l'élaboration des critères auxquels doivent satisfaire les colis de déchets radioactifs pour qu'il accepte de les prendre en charge, avant d'établir les critères d'acceptation proprement dits. Ces règles générales et ces critères d'acceptation peuvent être modifiés en fonction de l'évolution de l'architecture de dépôt, de la législation et des recommandations nationales et internationales, ainsi que des techniques de traitement et de conditionnement notamment, à l'initiative de l'ONDRAF ou de l'autorité compétente. Ils constituent une des avancées les plus notables en matière de gestion et d'assurance de la qualité des déchets radioactifs (voir aussi section 2.4). Bien entendu, tout colis de déchets radioactifs accepté par l'ONDRAF doit également satisfaire aux prescriptions légales et

réglementaires en application, y compris aux dispositions des licences d'exploitation des installations nucléaires concernées, et son transport doit satisfaire à la réglementation internationale de transport.

Les *règles générales*, qui ont été approuvées par l'autorité compétente et sont entrées en application le 10 février 1999, passent en revue tous les aspects (essentiellement mécaniques, physiques, chimiques, radiologiques et biologiques) qui doivent faire l'objet de critères d'acceptation. Elles précisent ensuite différentes exigences administratives comme l'obligation de documenter tous les colis individuellement et de les identifier de façon univoque, la procédure d'acceptation des colis, les obligations faites aux exploitants nucléaires qui conditionnent des déchets pour prouver la conformité de leurs colis aux critères d'acceptation, les alternatives envisageables en cas de non-conformité des colis, les modalités techniques et administratives de suivi de leurs caractéristiques dans le temps et la révision des critères d'acceptation.

Les *critères d'acceptation*, qui couvrent actuellement la majeure partie des productions de déchets radioactifs conditionnés, sont établis séparément pour chaque classe de déchets et font tous l'objet d'une documentation et d'une justification systématique. Outre certaines spécifications administratives, ils spécifient les exigences de qualité minimales, essentiellement techniques, auxquelles les colis doivent satisfaire pour pouvoir être acceptés par l'ONDRAF. Tout colis primaire doit satisfaire à diverses exigences liées à sa résistance mécanique, au pourcentage maximum de vide qu'il peut contenir, à sa résistance aux rayonnements, à son niveau de contamination superficielle et à son contenu en matières dangereuses, notamment à son contenu radiologique, et plus particulièrement à son contenu en radionucléides critiques. Il ne peut être le siège de réactions chimiques qui pourraient mettre en péril la sûreté de la gestion. Le déchet conditionné lui-même doit par ailleurs former un tout solide sans liquides libres, compact, chimiquement stable, non dispersable et peu susceptible de se fissurer, ainsi que satisfaire à différents critères qui varient selon le type de matrice qui l'immobilise. Il ne peut renfermer de matériaux putrescibles et ne peut contenir d'agents complexants en quantités telles qu'ils pourraient avoir un effet défavorable significatif sur le comportement des radionucléides à proximité du dépôt. Les dégagements gazeux dont il pourrait être le siège ne peuvent risquer de l'endommager ou de déformer exagérément son emballage. Ce dernier, enfin, doit satisfaire à des exigences relatives à ses caractéristiques géométriques, mécaniques et de résistance à la corrosion, ainsi plus généralement qu'au maintien de son intégrité.

Le respect des critères d'acceptation est influencé avant tout par l'étape de traitement et de conditionnement, qui est celle qui détermine le plus largement la qualité physique des déchets. Les installations de traitement et de conditionnement ainsi que les procédés qui s'y déroulent doivent donc être agréés par l'ONDRAF. Cet *agrément* se fait en quatre étapes. L'exploitant qui traite et conditionne les déchets (le producteur ou un sous-traitant de l'ONDRAF) soumet à l'ONDRAF un dossier technique d'agrément qui décrit le fonctionnement de l'installation et qui formalise et justifie toutes les dispositions prises pour garantir que ses colis de déchets conditionnés satisfont aux critères d'acceptation applicables. L'ONDRAF vérifie alors, éventuellement avec l'assistance d'un organisme agréé, que l'installation concernée

respecte bien les conditions du dossier d'agrément en y conduisant périodiquement des audits techniques. Il vérifie ensuite, toujours assisté d'un organisme agréé, les procédés et les installations utilisés par l'exploitant pour caractériser la composition radiologique des déchets conditionnés dans l'installation à agréer. Il vérifie enfin la documentation démontrant la conformité des déchets conditionnés aux critères d'acceptation ainsi que la conformité du procédé appliqué aux données du dossier d'agrément de l'installation concernée. Si toutes ces vérifications sont concluantes, l'ONDRAF prononce l'agrément du procédé et de l'installation de traitement et de conditionnement concernés ainsi que de la méthode et de l'installation de caractérisation. Cet agrément est valable pour une période déterminée.

La *procédure d'acceptation* des colis de déchets radioactifs conditionnés est le processus administratif par lequel l'ONDRAF s'assure, par des contrôles à la fois administratifs et techniques, que le dossier de conformité qui accompagne les déchets que l'exploitant lui demande de prendre en charge est correctement établi et que les déchets sont conformes à ce dernier, et donc aux critères d'acceptation applicables. Cette opération ayant des implications techniques, de sûreté et financières, *chacune de ses phases doit être documentée* selon des modalités élaborées au préalable. En pratique, et de façon simplifiée, chaque fois qu'il reçoit une demande d'enlèvement de déchets conditionnés, l'ONDRAF commence par contrôler le dossier de production qui l'accompagne. Ce dossier contient notamment les résultats des calculs de caractérisation radiologique et physicochimique effectués par l'exploitant pour vérifier la conformité des déchets aux critères d'acceptation en vigueur au moment de leur production. Il effectue alors des contrôles physiques ponctuels des colis concernés afin de vérifier qu'ils sont effectivement conformes aux indications du dossier et établit un procès-verbal de réception pour enlèvement reprenant les résultats de ces contrôles et les réserves éventuelles. Il planifie ensuite le transport des colis et établit le procès-verbal d'acceptation, qui acte la conformité des colis aux critères ou reprend les conditions sous lesquelles ils ont été acceptés, ainsi que le procès-verbal de transfert. Les colis sont alors transférés vers l'installation d'entreposage qu'il a désignée, où il les contrôle physiquement pour ensuite établir le procès-verbal de réception pour entreposage. Conformément aux dispositions légales qui prévoient que celui qui a conditionné les déchets reste responsable pendant 50 ans des vices cachés qui pourraient s'y révéler, l'ONDRAF développe actuellement un plan destiné à contrôler périodiquement le maintien de la conformité des colis aux critères d'acceptation pendant leur entreposage et donc leur compatibilité avec le dépôt final de référence. Si un colis n'est plus compatible avec sa destination finale, il doit faire l'objet de mesures correctives, un reconditionnement constituant le cas le plus extrême.

3.2 La formation-hôte et l'environnement du système de dépôt

Le rôle prépondérant de la barrière naturelle dans les performances d'un système de dépôt en profondeur au sein de l'Argile de Boom ayant été souligné de manière récurrente par les évaluations de la sûreté radiologique à long terme (voir chapitre 4), l'ONDRAF a, au cours de la période 1990–2000, intensifié ses travaux en matière de caractérisation et de compréhension de l'Argile de Boom à l'aplomb et aux alentours immédiats de la zone nucléaire de Mol–Dessel. Conformément aux recommandations de la Commission d'évaluation SAFIR (1990), son programme de recherche et développement méthodologique s'est focalisé sur

- la caractérisation des hétérogénéités lithologiques de l'Argile de Boom ;
- la mise en évidence des discontinuités structurales (failles, etc.) affectant cette argile ;
- l'amélioration de la compréhension et de la modélisation de l'hydrogéologie régionale et locale et ce, pour les aquifères situés tant au-dessus qu'au-dessous de l'Argile de Boom.

S'y ajoutent l'établissement du fond radiologique naturel de l'argile et une étude du comportement des radionucléides qui y sont naturellement présents.

(Le comportement géomécanique de l'Argile de Boom est traité dans la section 3.6 consacrée aux perturbations. Par ailleurs, étant donné le caractère préliminaire des reconnaissances relatives aux Argiles Yprésiennes et la différence significative de niveau d'avancement entre l'option de référence et l'option alternative en termes de développement d'une installation de dépôt en profondeur, l'ensemble des informations pertinentes aux Argiles Yprésiennes est traité tout à fait séparément de celles relatives à l'Argile de Boom, à la section 3.8.)

3.2.1 La sélection et le statut des formations-hôtes étudiées en Belgique

D'une manière générale, on observe une évolution très nette dans les approches proposées au niveau international pour la sélection de formations géologiques ou de sites appropriés pour la mise en dépôt en profondeur. On est en effet passé de l'application de critères d'exclusion liés à la formation-hôte à une approche globale d'évaluation et d'optimisation des performances et de la sûreté du système de dépôt dans son ensemble. Cette approche intégrée et systémique de la sélection des formations-hôtes, du développement du système de dépôt et de son évaluation ne remet toutefois nullement en cause l'importance fondamentale de la barrière géologique dans la garantie de la sûreté radiologique à long terme.

En Belgique, les études concernant la mise en dépôt en profondeur des déchets des catégories B et C ont été entamées au milieu des années septante par le CEN-SCK, avec l'aide du Service géologique de Belgique. La poursuite des recherches sur l'Argile de Boom à l'aplomb de la zone nucléaire de Mol–Dessel (fig. 3.2) a été encouragée par la Commission d'évaluation en matière d'énergie nucléaire qui note, dans son rapport final daté de mars 1976, que, pour la Belgique, les couches argileuses profondes semblent être la meilleure solution pour la mise en dépôt en profondeur de ces déchets. La même année, la Commission européenne entreprit d'établir, sur base bibliographique, un inventaire européen des

formations géologiques pouvant présenter des caractéristiques favorables à la mise en dépôt en profondeur des déchets des catégories B et C. Pour des raisons pratiques liées notamment à l'échelle de l'étude, cette sélection s'opéra uniquement par l'application de critères d'exclusion liés à la lithologie (argile, sel ou granite), à la profondeur et à l'épaisseur. En Belgique, seules des formations argileuses purent être retenues dans le cadre de cette étude. Elles se subdivisent en deux grands groupes :

- les formations composées de roches dures (schistes, schisto-phyllades) appartenant au Paléozoïque (par exemple au sein des massifs Cambro-siluriens du Brabant et de l'Ardenne) ;
- les formations composées de roches peu indurées, plastiques, appartenant au Cénozoïque (Argiles Yprésiennes et Argile de Boom).

En ce qui concerne les roches dures, peu d'informations pertinentes étaient, à l'époque, disponibles sur leurs propriétés en profondeur. Les résultats préliminaires très encourageants quant à la lithologie et à la capacité de confinement de l'Argile de Boom à l'aplomb de la zone nucléaire de Mol-Dessel menèrent donc le CEN-SCK puis l'ONDRAF à amplifier les efforts de recherche sur cette formation et sur cette zone. Ce choix était renforcé par une série de considérations pratiques telles que l'avantage que constituait la présence d'une infrastructure scientifique multidisciplinaire bien développée au-dessus de la formation considérée et les garanties d'accès qu'offrait la dénomination de « zone nucléaire » sur les plans de secteurs régionaux d'aménagement du territoire.

Une quinzaine d'années plus tard, la Commission d'évaluation SAFIR (1990) conclut que le choix d'étudier l'Argile de Boom sous la zone nucléaire de Mol-Dessel se justifiait, mais qu'il pourrait s'avérer utile d'examiner d'autres localisations, comme la zone nucléaire de Doel (fig. 3.2), à l'aplomb de laquelle on trouve les Argiles Yprésiennes. Se conformant à ces conclusions, l'ONDRAF entreprit un programme de recherche sur ces argiles à Doel au début des années nonante.

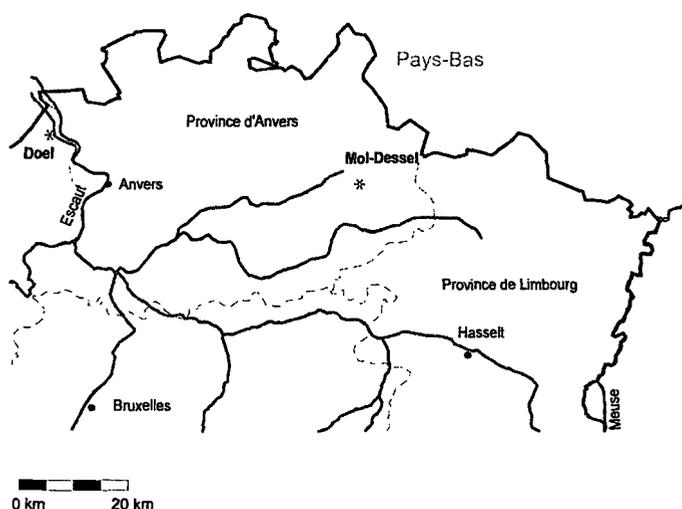


Figure 3.2 Localisation des zones nucléaires de Mol-Dessel et de Doel, respectivement le site de référence et le site alternatif pour études méthodologiques en matière de mise en dépôt en profondeur des déchets des catégories B et C.

L'ONDRAF évalue actuellement le *potentiel de sûreté et de faisabilité* de deux formations-hôtes sur base d'études effectuées sur deux sites pour études méthodologiques. Le choix de ces formations-hôtes, toutes deux constituées d'argiles peu indurées, se base sur des motifs techniques, alors que celui des deux sites d'investigation résulte de considérations historiques, institutionnelles et pratiques. Plus précisément, l'ONDRAF considère

- l'Argile de Boom comme la *formation-hôte de référence* pour la recherche et l'évaluation d'une solution de dépôt en profondeur pour les déchets des catégories B et C en Belgique, l'objectif étant de démontrer qu'il existe une solution sûre pour la gestion à long terme de ces déchets et qu'elle peut être mise en œuvre, sans préjuger de l'endroit où, le cas échéant, cette mise en œuvre aura lieu ;
- la zone nucléaire de Mol-Dessel comme le *site de référence pour les études méthodologiques* relatives à l'Argile de Boom ;
- les Argiles Yprésiennes comme une *formation-hôte alternative* pour la recherche et l'évaluation d'une solution de dépôt en profondeur en Belgique ;
- la zone nucléaire de Doel comme un *site alternatif pour les études méthodologiques* relatives aux Argiles Yprésiennes.

D'un point de vue technique, la désignation d'une alternative permet, d'une part, de disposer d'une solution de rechange au cas où l'on démontrerait que le système de dépôt de référence n'est pas en mesure de remplir ses fonctions de sûreté ou d'être réalisé et, d'autre part, d'améliorer la compréhension des deux systèmes à l'étude, notamment par l'analyse de la transférabilité des connaissances d'une formation ou d'un site vers l'autre.

3.2.2 L'Argile de Boom comme formation-hôte

Le rôle prépondérant de la barrière naturelle ayant été souligné de manière récurrente par les évaluations de la sûreté radiologique à long terme, l'ONDRAF a, au cours de la période 1990–2000, intensifié ses travaux en matière de caractérisation et de compréhension de l'Argile de Boom à l'aplomb et aux alentours immédiats de la zone nucléaire de Mol-Dessel.

Les hétérogénéités lithologiques et structurales de l'Argile de Boom et de ses encaissants ont principalement été étudiées au moyen de méthodes géophysiques appliquées soit en forages (diagraphies), soit à partir de la surface (sismique réflexion), auxquelles s'ajoutent des tests sur carottes (fig. 3.3).

Enfin, l'Argile de Boom fait également l'objet de recherches fondamentales et appliquées intenses hors du cadre du programme de mise en dépôt en profondeur, que ce soit en zone d'affleurement (argilières de la région du Rupel et du Waasland) ou lors du creusement de tunnels (pré-métro d'Anvers, tunnel du Rupel).

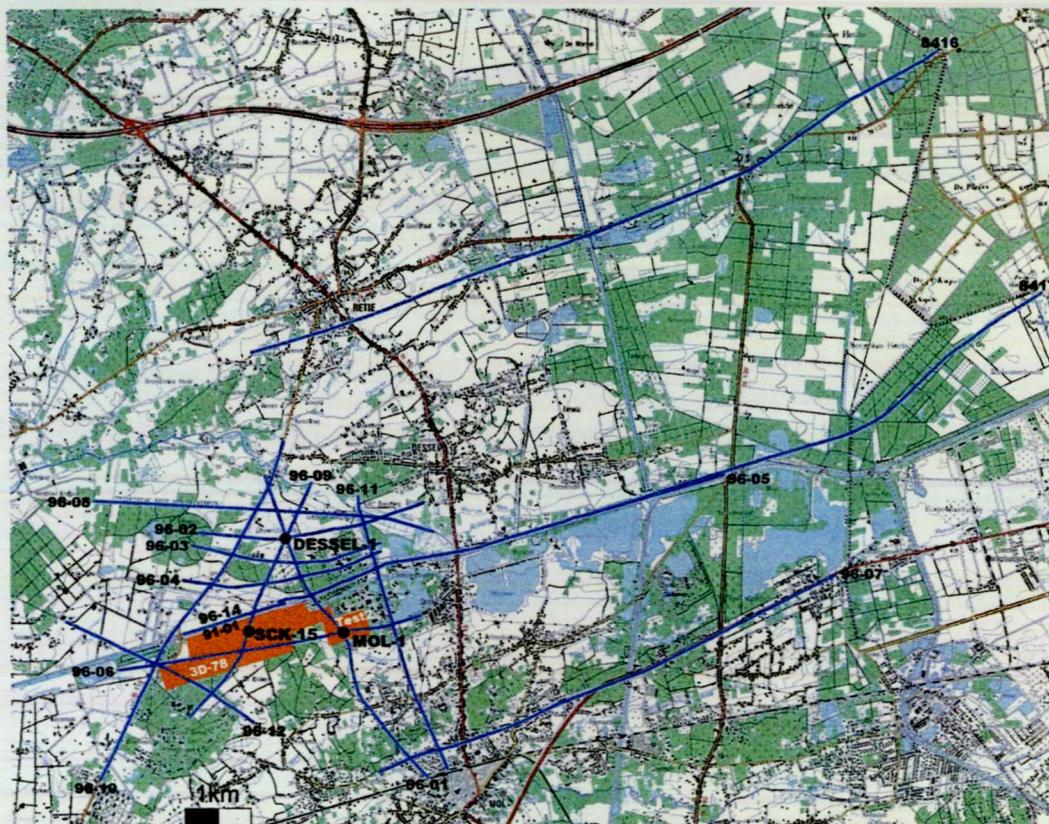


Figure 3.3 Localisation des principaux forages et campagnes de reconnaissances géophysiques sur et autour de la zone nucléaire de Mol-Dessel.

3.2.2.1 Caractérisation stratigraphique et lithologique

La région où l'Argile de Boom est présente correspond approximativement à la Campine, soit au nord-est de la Belgique. L'Argile de Boom, ou Formation de Boom, appartient au Rupélien, la période géologique de l'Ere Tertiaire qui s'étend entre 36 et 30 millions d'années. Elle est subdivisée de bas en haut en trois membres : Belsele-Waas, Terhagen et Putte.

L'Argile de Boom est une argile silteuse ou un silt argileux présentant une teneur importante en pyrite et en glauconie dans ses bandes les plus silteuses. Une de ses caractéristiques les plus remarquables est précisément cette structure en bandes de quelques dizaines de centimètres d'épaisseur, qui traduit principalement des variations cycliques de granulométrie (teneur en silt et en argile) dues aux fluctuations de l'action des vagues sur le milieu de sédimentation, mais aussi des variations des teneurs en carbonates et en matière organique (figs. 3.4 et 3.5). Des bandes très sombres, riches en matière organique, particularisent le Membre de Putte, alors que des bandes marneuses, de couleur gris-blanc, apparaissent sur toute l'épaisseur de la formation. C'est dans ces dernières qu'on trouve des concrétions calcaires typiques appelées septarias (fig. 3.6). La base (Membre de Belsele-Waas) et le

sommet (partie supérieure du Membre de Putte) de l'Argile de Boom sont distinctement plus silteux. On constate en fait une transition granulométrique entre l'argile « pure » (partie inférieure du Membre de Putte et Membre de Terhagen) et les couches sableuses sus-jacentes.

Les sédiments clas-tiques (c'est-à-dire déposés par décanta-tion de particules solides dans l'eau, la glace ou l'air) sont notamment classés en fonction de la taille des grains qui les composent, taille qui est indicative de l'énergie nécessaire à la migration des particules, et donc du milieu dans lequel le sédiment a été déposé. Ainsi, des particules très fines ne peuvent décanter que dans de l'eau très tranquille.

L'échelle granulomé-trique est divisée en plusieurs fractions :

- argile**
∅ particules < 0.002 mm.
- silt** 0.002 mm <
∅ particules < 0.062 mm.
- sable** 0.062 mm <
∅ particules < 2 mm.
- gravier**
∅ particules > 2 mm.

Les sédiments com-posés d'argile, de silt ou de sable très fin ont des conductivités hydrauliques faibles (< 10⁻⁶ m·s⁻¹) et des porosités élevées, souvent supérieures à 40 %. Les sables et graviers forment, eux, de bons aquifères.

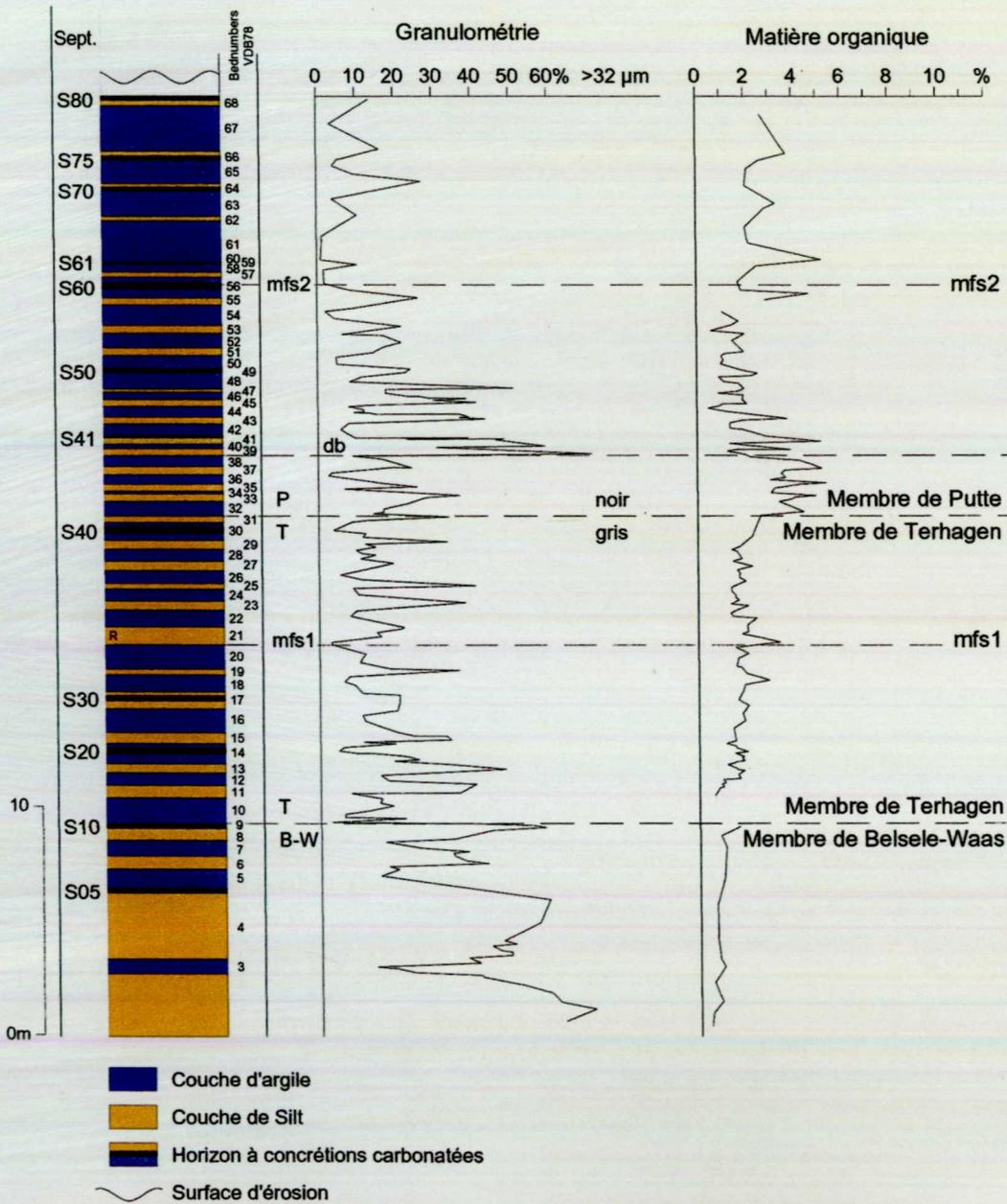


Figure 3.4 Profil lithostratigraphique de l'Argile de Boom et variations lithologiques.

Figure 3.5 Vue générale d'une argillère montrant la structure en bandes caractéristique de l'Argile de Boom.



Septaria Concrétion calcaire en forme de pain pouvant atteindre 30 cm de hauteur et un diamètre d'un mètre et caractérisée par des fissures de dessiccation ou septae. Ces fissures sont souvent recouvertes d'un film de cristaux de calcite ou de pyrite. Les septarias se sont formés dans les bandes riches en calcaire sous l'action de processus diagénétiques induits notamment par la précipitation, autour d'organismes en putréfaction (micro-environnement basique), des carbonates. Les bancs de septarias permettent de relier stratigraphiquement les différentes argillères ainsi que les forages profonds.

Figure 3.6 Vue d'un septaria.



L'Argile de Boom affleure au nord de la Durme, du Rupel et de la Dyle, ainsi qu'au nord de la ligne Louvain-Tongres. Cette zone d'affleurement forme un cordon de 5 à 15 km de large, interrompu dans le Hageland par un chenal profondément érosif comblé par les Sables de Diest. On ne retrouve toutefois pas à l'affleurement la séquence stratigraphique complète de la formation, les couches du sommet ayant été érodées au cours d'un épisode continental (interruption de sédimentation) de quelque 9 millions d'années qui suivit leur dépôt. Par reconstruction géométrique, on peut estimer que quelques dizaines de mètres d'argile ont été érodées dans la majeure partie de la Campine anversoise. Dans la zone d'affleurement, l'épaisseur de l'Argile de Boom varie entre 30 et 50 m. Elle atteint 75 m au nord d'Anvers et avoisine les 100 m en Campine septentrionale (fig. 3.7). L'épaisseur de la partie strictement argileuse de la formation diminue toutefois en direction de l'est.

La Formation de Boom présente une pente de 1 à 2 % vers le nord-est et s'épaissit dans cette direction. Sa base, qui se situe à une profondeur de plus de 400 m (fig. 3.7) dans le nord de la Province d'Anvers, proche de la frontière avec les Pays-Bas, se situe à plus de 1 000 m en

certains endroits au sein du Graben de Roermond, en raison du jeu des failles. Il semblerait que dans la région de Mol-Dessel, l'Argile de Boom n'ait jamais été enfouie à une profondeur supérieure à celle à laquelle elle se trouve actuellement, soit entre 190 et 290 m sous la surface environ.

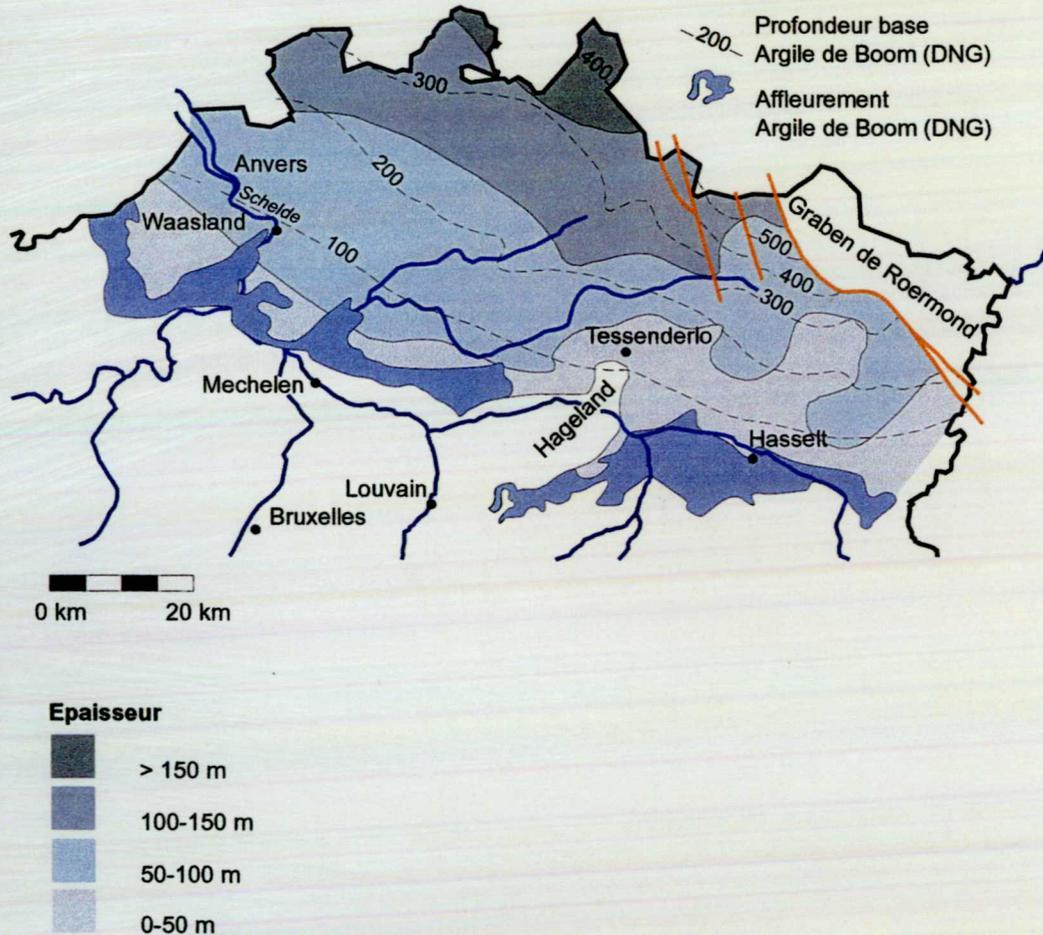


Figure 3.7 Profondeur de la base, et épaisseur, de la Formation de Boom.

Deux forages recoupant les formations tertiaires ont été effectués sur la zone nucléaire de Mol-Dessel au cours des années nonante. Le premier (Dessel-1, 1993) a atteint une profondeur de 613 m alors que le second (Mol-1, 1996) s'est arrêté à 572 m. Ce dernier a en outre été carotté entre 150 et 332 m de profondeur, de manière à obtenir des échantillons de toute l'épaisseur de la Formation de Boom et des formations avoisinantes (fig. 3.8).

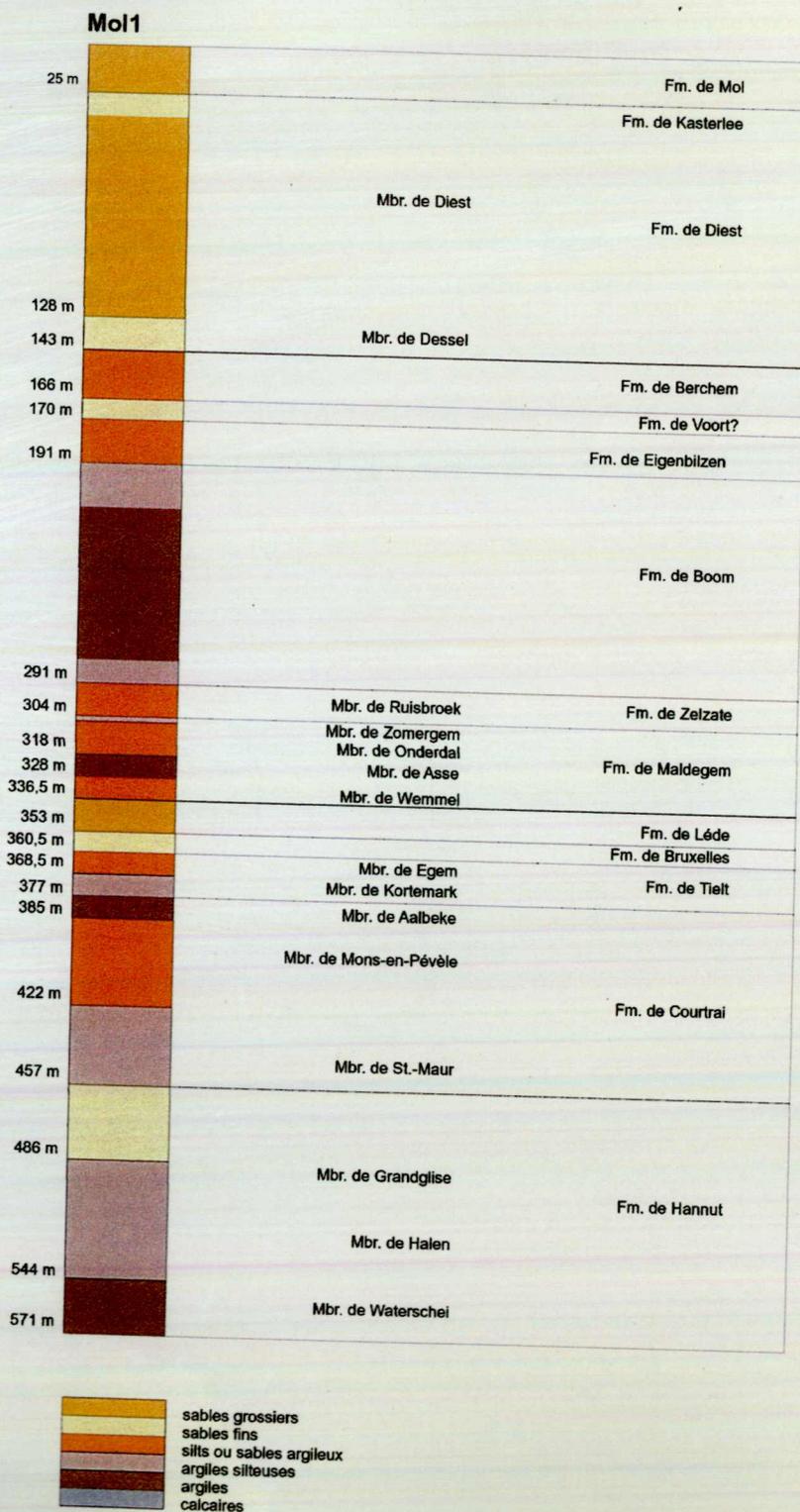


Figure 3.8 Coupe géologique à l'aplomb du forage Mol-1.

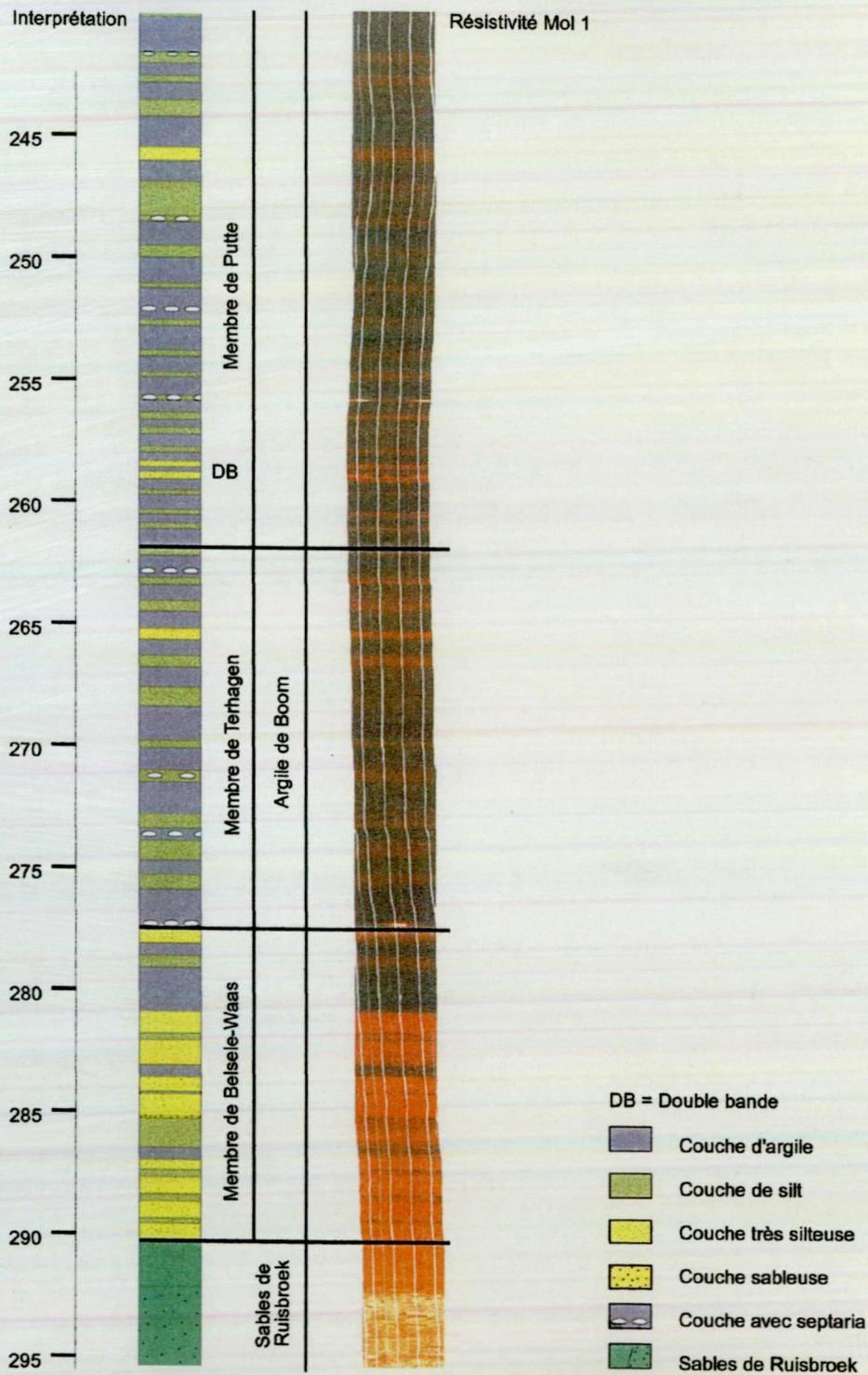


Figure 3.9 Imagerie de résistivité à l'aplomb du forage Mol-1 et l'interprétation sur base de différentes diagraphies et d'observations sur terrain (voir aussi figs. 3.4 et 3.5).

Une série d'outils de diagraphie de haute résolution verticale (quelques centimètres à quelques décimètres) et/ou de conception très récente (imagerie de résistivité, résonance magnétique nucléaire) a été utilisée afin de mettre en évidence les variations lithologiques fines au sein de l'Argile de Boom. Une interprétation préliminaire des résultats indique que ces outils, et spécialement ceux permettant une imagerie basée sur des mesures de résistivité électrique, permettent de mettre parfaitement en évidence les alternances lithologiques et granulométriques (argile/silt) ainsi que les bancs de septarias typiques de l'Argile de Boom. Ces alternances peuvent en outre être parfaitement corrélées avec les séquences définies en argilières, à plus de 50 km de la zone nucléaire, ce qui met en évidence la remarquable continuité latérale de cette argile (fig. 3.9). Seuls le Membre de Belsele-Waas et la partie la plus sommitale du Membre de Putte (sommet de la zone de transition) montrent des caractéristiques diagraphiques franchement différentes de celles du reste de la colonne d'argile, ce qui plaide en faveur d'une relative homogénéité de la plus grande partie de l'Argile de Boom. En particulier, les résultats obtenus au moyen de la sonde de résonance magnétique nucléaire indiquent une distribution assez homogène des conductivités hydrauliques (perméabilités) et des porosités, excepté dans ces mêmes parties basale et sommitale.

Composition

Différentes analyses (diffractométrie RX, *Fourier Transform InfraRed analysis*) ont été réalisées afin de réduire les divergences tant quantitatives que qualitatives relatives à la *composition minéralogique* mises en évidence dans le rapport SAFIR. Leurs résultats concordent en ce qui concerne les proportions des différentes fractions minérales en présence ; ils divergent par contre quant à la minéralogie des argiles. La grande variation du contenu en minéraux argileux (phyllosilicates), qui oscille entre 30 et 70 %, avec une moyenne à 55 %, est due à l'hétérogénéité lithologique verticale de l'Argile de Boom (table 3.4). La fraction non argileuse du sédiment est constituée, par importance décroissante, de quartz, de feldspaths, de carbonates et de pyrite. La quantification détaillée des différents minéraux argileux en présence reste toutefois incertaine.

Bien qu'on puisse obtenir une image continue de la minéralogie de la formation en utilisant un modèle combinant les résultats des différentes diagraphies et de calibrations par analyses en laboratoire, une telle modélisation conduit pour l'Argile de Boom à une surestimation des teneurs en minéraux argileux. Il importe néanmoins de poursuivre cette caractérisation, notamment en vue de modéliser les interactions géochimiques ou les phénomènes de rétention des radionucléides sur les phases minérales, ou encore afin d'étudier les effets des perturbations induites par le dépôt (présence d'un front alcalin, impact thermique, etc. ; voir section 3.6).

La porosité totale de l'Argile de Boom avoisine les 30 à 40 % en volume, tout comme sa *teneur totale en eau*, déduite des analyses sur carottes. La modélisation faite en combinant les résultats des mesures diagraphiques réalisées lors du forage Mol-1 fournit une distribution verticale relative des teneurs totales en eau et montre une augmentation de ces dernières là

où la formation est la plus riche en minéraux argileux, ce qui confirme qu'au sein d'un sédiment argileux, la majeure partie de l'eau n'est pas libre, mais bien liée aux minéraux argileux. De l'eau libre n'apparaît que dans le Membre de Belsele-Waas et dans la partie sommitale de la zone de transition.

Enfin, l'Argile de Boom contient de l'ordre de 1 à 3% en poids de *matière organique*, laquelle joue un rôle fondamental dans la migration des radionucléides (voir section 3.5).

Table 3.4 Principales caractéristiques minéralogiques de l'Argile de Boom.

Caractéristique	Valeur
Composition minéralogique [% vol., matière sèche]	
□ Minéraux argileux	30 à 70 (moyenne 55)
– Illite	50
– Smectite	30
– Kaolinite	10
– Chlorite	≈ 5
– Glauconie	≈ 3
□ Quartz	20
□ Feldspaths	5 à 10
□ Carbonates	1 à 5
□ Pyrite	1 à 5
Teneur en matière organique [% poids, matière sèche]	1 à 3
Teneur en eau [% vol.]	30 à 40

Géochimie

Le projet ARCHIMEDE-ARGILE, réalisé sous l'égide de la Commission européenne et destiné à améliorer la compréhension de la *géochimie* des eaux interstitielles en milieu argileux et de son évolution, a notamment conduit à la conclusion importante que l'Argile de Boom semble avoir été en équilibre géochimique depuis la fin de sa sédimentation, ce qui tend à confirmer ses bonnes capacités de tampon chimique. En outre, la présence de bactéries sulphato-réductrices et méthanogènes en son sein a été mise en évidence, ce qui semble indiquer que de tels micro-organismes, piégés dans l'argile au moment de sa sédimentation il y a 35 millions d'années, y existent toujours à l'état latent. De nouvelles études devront confirmer cette observation qui pourrait avoir des conséquences importantes pour la migration des gaz au sein de l'Argile de Boom, la géochimie du champ proche et la durabilité des barrières ouvragées.

Une étude du maintien sur de longues périodes des conditions géochimiques actuelles de l'Argile de Boom, très favorables au retard des radionucléides, va être entreprise afin d'étayer

la définition des scénarios d'évolution géologique et hydrogéologique normale et altérée de la formation-hôte et de son environnement dans le cadre des évaluations de la sûreté radiologique à long terme ($E_h = -0.250$ mV/SHE, réducteur ; pH = 8.2, légèrement alcalin ; voir aussi section 3.5).

Une caractérisation *radiochimique* de la phase solide a été entreprise afin d'établir le fond radiologique naturel de la formation-hôte, de supporter les évaluations de la sûreté radiologique à long terme en étudiant les concentrations et le comportement des radionucléides qui y sont naturellement présents, et de contribuer à l'évaluation de son homogénéité verticale. Les conclusions préliminaires de cette étude sont les suivantes.

- Les isotopes du thorium et de l'uranium sont généralement à l'équilibre radioactif, ce qui indique une mobilité réduite sur des périodes de l'ordre du million d'années.
- La mobilité du radium est plus variable que celle du thorium et de l'uranium et est clairement contrôlée par la lithologie, le radium étant plus mobile dans les bandes silteuses.
- Un fractionnement isotopique, témoignant d'un lessivage de l'uranium et du radium, a été mis en évidence sur un échantillon prélevé au sein de la « double bande », une bande caractérisée par une augmentation de la granulométrie, et donc par une porosité et une conductivité hydraulique plus élevées que dans l'argile avoisinante.

Les recherches futures en matière de caractérisation radiochimique devraient permettre de confirmer la faible mobilité des radionucléides naturellement présents dans l'Argile de Boom. Elles porteront sur la phase liquide, le fractionnement observé au sein de la double bande et l'influence de la transition avec les sables aquifères sus-jacents.

3.2.2.2 Caractérisation tectonique et sismique

Le Bassin de la Campine est un bassin sédimentaire généralement peu tectonisé et présentant des couches quasi horizontales, en cours de subsidence (abaissement du niveau moyen). La partie nord-orientale du bassin est perturbée par un système complexe de failles d'orientation générale NNO-SSE : le Graben de Roermond, un fossé d'effondrement encore actif qui affecte notamment l'Argile de Boom. (Pour la partie centrale du graben, on observe une subsidence de 0.25 à 0.5 mm par an au cours des deux derniers millions d'années.) Les failles de Poppel et de Rauw, situées respectivement à 5 et 7 km à l'est de la zone nucléaire de Mol-Dessel, sont les signes visibles en surface les plus occidentaux de cet accident tectonique.

Les variations d'épaisseur de l'argile montrent que le Graben de Roermond était actif au moment de son dépôt. Le séisme le plus important de ces 200 dernières années est celui de Roermond en avril 1992. Il a atteint une magnitude de 5.8 sur l'échelle de Richter et une intensité VII sur l'échelle MSK autour de l'épicentre. On estime que son origine se situait à une profondeur de 17 km et que la faille bordière occidentale du Graben de Roermond, la faille de Peel, a travaillé sur une distance de 4 km au long desquels les deux blocs situés de part et d'autre de la faille ont été déplacés sur une hauteur de 10 à 20 cm. La faille de Rauw,

elle, était encore active au cours des temps géologiques récents, avec un mouvement moyen de l'ordre du mètre par 100 000 ans.

Des recherches en cours sur le Graben de Roermond, notamment sous l'égide de la Commission européenne, concernant la survenue de séismes importants dans des régions à faible activité sismique suggèrent que l'on peut s'attendre à des séismes de plus grande magnitude et intensité, et ce avec une fréquence accrue par rapport à ce qui est actuellement considéré. Sur ces bases, l'ONDRAF a donc entrepris, dans le cadre de la définition des évolutions géologiques à long terme possibles pour la zone de Mol-Dessel et l'Argile de Boom (approche géoprospective), de réévaluer le risque sismique pour le nord-est de la Belgique. A une échelle plus locale, l'ONDRAF a entamé l'étude de détail des mouvements récents des failles les plus proches de Mol-Dessel, les failles de Poppel et de Rauw. A cela s'ajoute, pour l'Argile de Boom même, une étude de l'origine des différentes discontinuités structurales (failles, joints, etc.) naturelles ou induites par excavation (voir section 3.6).

En 1996, l'ONDRAF a réalisé une campagne de sismique réflexion (96-ON) bidimensionnelle sur et aux alentours de la zone nucléaire de Mol-Dessel, dont l'objectif premier était de mettre en évidence l'éventuelle présence de failles ou de flexures (déformations sans rupture) affectant l'Argile de Boom et les formations géologiques encaissantes. Des tests ont été réalisés préalablement afin d'optimiser la campagne et d'adapter les méthodes de haute résolution habituellement utilisées en exploration pétrolière aux conditions propres à l'Argile de Boom (profondeur limitée, formation peu indurée, etc.). La campagne de sismique réflexion totalise environ 65 km de profils d'acquisition, dont la majorité est orientée ouest-est, et recoupe les traces des failles connues les plus proches (Poppel et Rauw). Là où c'était possible, de faibles charges d'explosif ont été utilisées comme source de vibration ; des camions vibrateurs ont été requis en zones urbanisées. Des profils sismiques verticaux ont été réalisés dans les forages Dessel-1 et Mol-1 de manière à corréliser les données sismiques, exprimées par rapport au temps, avec les données de forages, exprimées par rapport à la profondeur. Cette campagne a été accompagnée d'une réinterprétation, voire d'un retraitement d'anciens profils sismiques, issus notamment de la campagne sismique tridimensionnelle réalisée en 1978 dans la partie méridionale de la zone nucléaire.

L'interprétation de l'ensemble des données de la campagne de sismique réflexion 96-ON est encore en cours, mais elle a déjà permis les constatations suivantes.

- Les profils obtenus ont une résolution tant verticale qu'horizontale de l'ordre de quelques mètres, ce qui devrait permettre de détecter toute faille présentant un rejet de plus de 5 m.
- Aucune faille de plus de 5 m de rejet vertical ne semble affecter l'Argile de Boom à l'aplomb et aux alentours immédiats de la zone nucléaire de Mol-Dessel.
- De nombreuses flexures apparaissent à l'échelle régionale dans les terrains tertiaires et trahissent en général des failles plus profondes, et donc plus anciennes, qui n'ont pas affecté l'Argile de Boom.
- Il est possible de définir une série de réflecteurs coïncidant avec des bandes spécifiques de l'Argile de Boom (fig. 3.10).

Magnitude

Mesure logarithmique de l'amplitude d'un séisme. (Une variation d'une unité sur l'échelle de Richter correspond à une amplitude 10 fois plus importante.) Le séisme du Chili en 1960 est, avec une magnitude de 8.5, le séisme le plus fort jamais enregistré.

Intensité Mesure, basée sur une description des dégâts aux constructions et au paysage, des effets d'un séisme. L'échelle MSK varie de I à XII.

- La base et le sommet de l'Argile de Boom ne correspondent cependant pas à des réflexions nettes, suite au caractère graduel des transitions entre les parties basale et sommitale de la formation-hôte (constituées d'argile silteuse ou sableuse) et les formations encaissantes sablo-argileuses.

Enfin, bien qu'il existe à l'échelle régionale un potentiel géothermique à grande profondeur au sein de certaines formations Carbonifères, Crétacées et Triassiques, il n'est pas dû à une activité volcanique au sein du Bassin de la Campine.

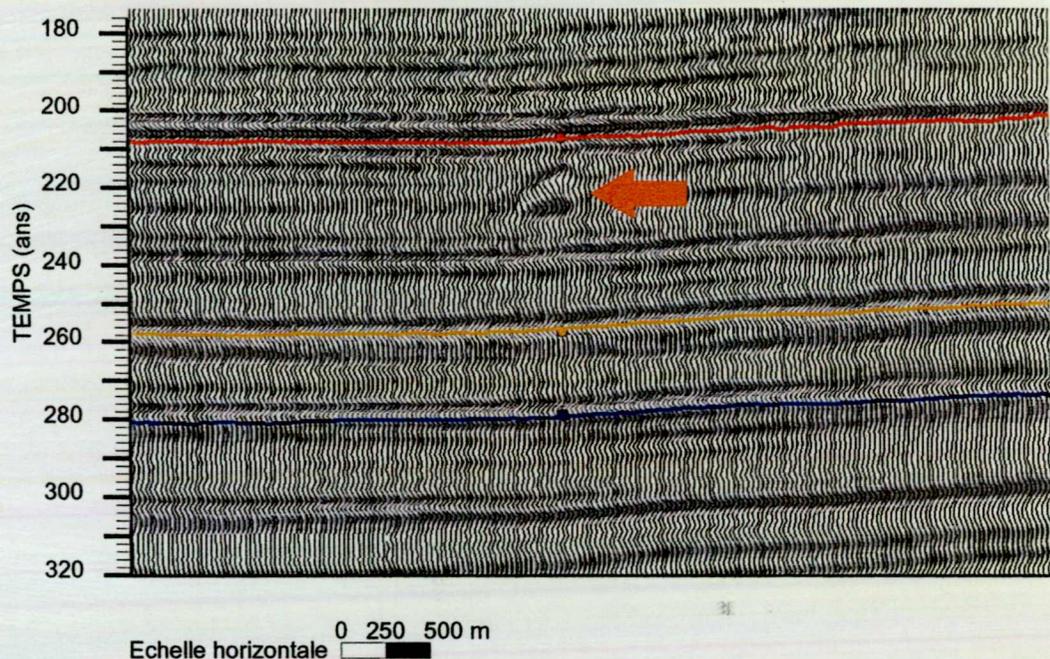


Figure 3.10 Détail du signal obtenu par sismique réflexion dans l'Argile de Boom (en rouge, la base de la zone de transition ; en jaune, la double bande ; en bleu, la base du Membre de Terhagen ; en orange, les réflexions générées par le laboratoire souterrain HADES).

3.2.2.3 Interprétation intégrée

Dans le futur, les résultats de l'ensemble des données géophysiques obtenues tant en forages qu'à partir de la surface seront combinés de manière à fournir une vision intégrée et cohérente de la géologie au sens large de l'Argile de Boom sous et aux alentours de la zone nucléaire de Mol-Dessel. Des traitements sismiques appropriés (inversion, modélisation pétro-acoustique) et des calibrations en laboratoire devraient aussi permettre d'obtenir une répartition spatiale de certaines propriétés pétrophysiques, comme la porosité, la teneur en sable et la saturation en fluides, le long des profils sismiques existants. A cela s'ajoutera une analyse systématique de la localisation des échantillons par rapport à la colonne lithologique de l'Argile de Boom afin, d'une part, d'affiner l'interprétation des données en matière

d'homogénéité ou d'hétérogénéité de l'Argile de Boom à différentes échelles et, d'autre part, d'assurer la traçabilité des informations.

La compréhension intégrée et cohérente (c'est-à-dire où les résultats issus des reconnaissances propres à chaque discipline des sciences de la terre seront testés les uns par rapport aux autres) qui résultera de ces études contribuera à préciser l'épaisseur effective et l'homogénéité de la formation-hôte vis-à-vis des caractéristiques et paramètres qui y contrôlent la migration des radionucléides.

3.2.3 L'hydrogéologie de l'Argile de Boom et de son environnement

La caractérisation hydrogéologique de l'Argile de Boom et des aquifères environnants est importante, dans la mesure où l'hydrogéologie représente l'interface incontournable entre la formation-hôte et la biosphère, au niveau de laquelle sont évaluées les conséquences radiologiques du relâchement de radionucléides à partir du dépôt. La zone d'étude couvre tout le nord-est de la Belgique — soit la Campine — et concerne 5 grandes unités hydrogéologiques englobant l'Argile de Boom jusqu'à une profondeur de l'ordre de 600 m.

3.2.3.1 Définition des unités hydrogéologiques

D'un point de vue hydrographique, la Campine appartient tant au Bassin de la Meuse qu'à celui de l'Escaut. La région autour de la zone nucléaire de Mol-Dessel est drainée, au nord-est, par la Nèthe de Mol, la Petite Nèthe et ses affluents la Nèthe de Dessel et la Nèthe Blanche, le Wamp et la Aa, et, au nord-ouest, par le Mark et le Grote Beek. L'ensemble de ces cours d'eau appartient au Bassin de l'Escaut.

L'épaisse couverture sédimentaire du Tertiaire et du Quaternaire du nord-est de la Belgique est constituée d'une superposition de couches sableuses et argileuses reposant sur le socle Crétacé légèrement incliné vers le nord-est. Il est donc facile d'imaginer un ensemble d'unités aquifères délimitées par des aquitards constitués par les formations argileuses lorsque celles-ci sont suffisamment importantes. Ces aquifères, qui s'approfondissent vers le nord, y sont donc aussi confinés, alors qu'ils affleurent dans le sud. Leurs caractéristiques hydrauliques sont typiquement celles d'un milieu poreux.

La figure 3.11 schématise la succession des aquifères et aquitards du Tertiaire et du Quaternaire du Bassin de la Campine. La partie centrale de la figure donne la manière dont ces unités sont conceptualisées en vue de la modélisation hydrogéologique régionale (voir section 3.2.4.2). L'aquifère du Néogène, qui regroupe schématiquement l'ensemble des sables qui reposent sur l'Argile de Boom, est le plus important de la région. Son épaisseur, qui dépasse le plus souvent 100 m, sa conductivité hydraulique élevée et sa faible salinité en font un aquifère fortement sollicité pour la production d'eau potable. C'est d'ailleurs le deuxième aquifère le plus important à cet égard à l'échelle de la Belgique et le premier pour le nord-est du pays. Il est en réalité composé d'une série de trois sous-unités plus ou moins perméables.

Aquifère Unité géologique perméable saturée qui contient des quantités d'eau exploitable.

Aquitard Unité géologique suffisamment perméable pour permettre le passage de quantités d'eau importantes mais, à la différence des aquifères, ce passage se fait sur des zones étendues et sur des périodes très longues. En raison de leur conductivité hydraulique réduite, les aquitards ne sont pas exploitables.

- La première sous-unité rassemble un ensemble d'aquifères perchés, constitués par des sédiments du Quaternaire et plus ou moins isolés par des dépôts argileux (aquifère de la Campine, terrasses de la Meuse, dépôts alluviaux de la vallée de la Meuse).
- La deuxième sous-unité est constituée des sables fluviatiles ou estuariens du Rhin que sont les Sables de Mol, Brasschaat et Merksplas. On peut y ajouter, à sa base, une partie des Sables de Poederlee et les Sables de la Formation de Kasterlee. Vu la dominance de dépôts du Pliocène, cette sous-unité est souvent appelée aquifère du Pliocène. L'aquifère du Pliocène est plus ou moins isolé de l'aquifère inférieur par la présence d'argile en couches ou en lentilles (au sein des Formations de Lillo et de Kattendijk à l'ouest et de la Formation de Kasterlee à l'est). Cet ensemble semi-perméable, ou aquitard de Lillo-Kasterlee, contribue à une légère différenciation des régimes hydrauliques des deux aquifères encaissants, sans empêcher une communication lente entre eux.
- La troisième sous-unité est la plus importante de la région. C'est l'aquifère du Miocène, parfois appelé aquifère du Diestien, qui comprend une petite partie des Sables de Kasterlee, les Sables de Kattendijk, Diest, Dessel, Berchem et Bolderberg. On y ajoute parfois ceux de Voort et éventuellement d'Eigenbilzen, qui restent en très bon contact hydraulique mais qui présentent des conductivités hydrauliques nettement plus faibles.

L'Argile de Boom joue un rôle primordial dans le système hydrogéologique régional en séparant l'aquifère du Néogène des aquifères sous-jacents. Les différents aquifères entrent toutefois en communication directe dans la région de Diest et d'Averbode du fait du ravinement de l'argile (chenal d'érosion de Diest). Dans le nord-est, les failles satellites du Graben de Roermond qui affectent l'Argile de Boom pourraient également influencer le comportement hydraulique des aquifères superposés, mais leur effet est méconnu. Cette zone coïncide aussi avec la crête de partage des bassins de la Meuse et de l'Escaut.

Sous l'Argile de Boom se situe l'aquifère du Sous-Rupélien, souvent appelé aquifère de Ruisbroek-Berg, qui est peu sollicité pour la production d'eau du fait de son faible rendement lié à une faible conductivité hydraulique, de son hétérogénéité et de sa salinité élevée (cependant encore dans les normes adoptées en Flandre pour l'eau potable). Il est souligné de façon relativement claire par les Argiles d'Ursel et Asse, du moins dans la partie occidentale de la région. Vient ensuite l'aquifère du Lédo-Bruxellien qui, comme celui du Sous-Rupélien, est peu sollicité dans la région étudiée suite à sa salinité élevée et à sa faible conductivité hydraulique. L'aquifère du Lédo-Bruxellien est lui-même bordé à sa base par les formations argileuses du Groupe d'Ypres, qui constituent une bonne barrière hydraulique. Enfin, les couches de sables fins du Landénien renferment un aquifère peu épais, qui n'est pratiquement pas exploité en raison de son faible rendement et de sa salinité trop élevée. Les aquifères situés sous celui du Landénien ne présentent qu'un intérêt limité à ce stade. Seul le Maastrichtien semble encore être exploité localement, malgré la forte minéralité de ses eaux.

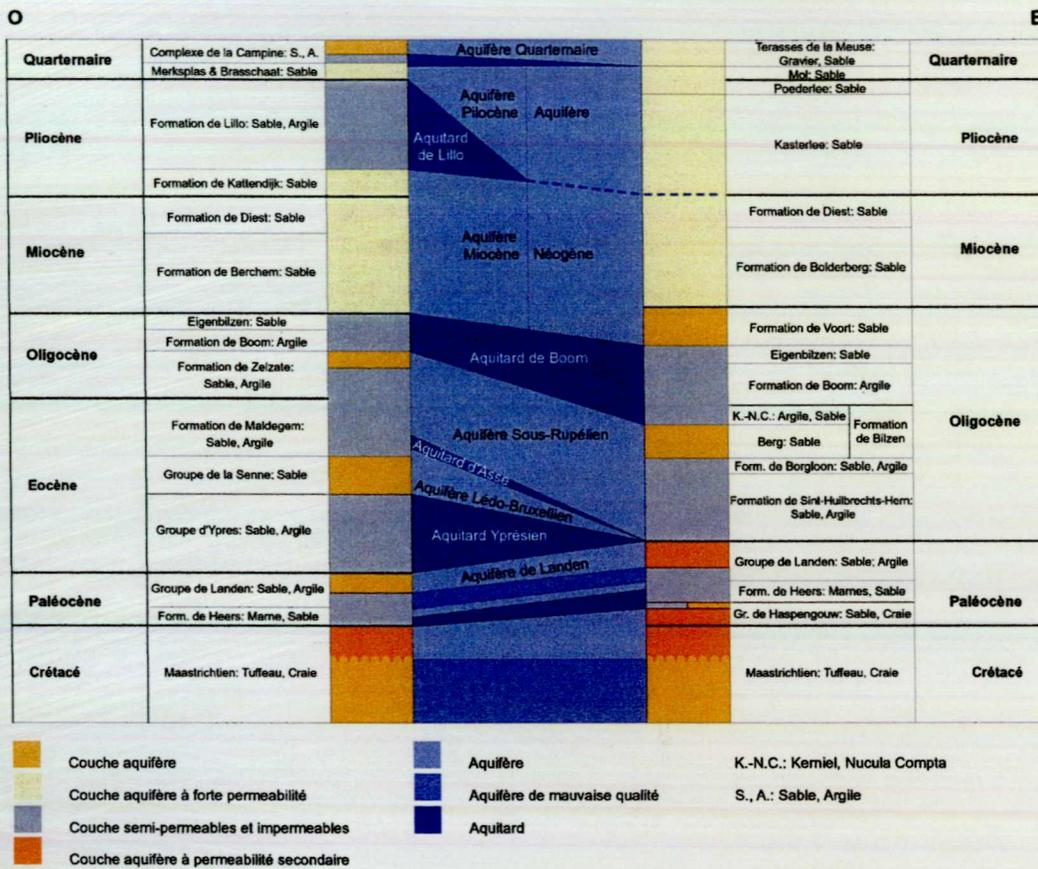


Figure 3.11 Succession schématique des aquifères et aquitards du Tertiaire et du Quaternaire du Bassin de la Campine.

3.2.3.2 Evolutions piézométriques

Depuis le début du programme belge, un total de 130 piézomètres a été installé en 40 localisations distinctes, principalement dans l'aquifère du Néogène, afin de mesurer les niveaux des eaux souterraines et leurs fluctuations dans le temps et, ainsi, de déterminer les gradients hydrauliques et les directions des écoulements souterrains (fig. 3.12). Ces mesures permettent aussi de calibrer les modèles hydrogéologiques (voir section 3.2.4).

L'évolution des niveaux piézométriques de l'aquifère du Néogène (fig. 3.13) montre des variations saisonnières typiques des nappes phréatiques. Les niveaux les plus bas sont observés entre avril et novembre, avec un minimum en juillet et août ; les niveaux les plus hauts sont observés entre novembre et avril et atteignent quasiment le niveau du sol. L'amplitude de ces fluctuations est de l'ordre de deux à trois mètres, mais elle peut s'atténuer en profondeur, surtout si des lits de sables fins ou argileux sont présents localement. Les aquifères du Sous-Rupélien et du Léo-Bruxellien sont confinés et ne présentent dès lors pratiquement pas de fluctuations saisonnières. Ils sont par contre plus sensibles à toute autre forme de perturbation telle que les prélèvements d'eau. La figure 3.13 montre une légère mais

Drainance Transfert d'eau lent à composante essentiellement verticale entre un aquifère et un autre au travers d'une couche semi-perméable (aquitard). Ce transfert est fonction, d'une part, du gradient de pression entre les deux aquifères et, d'autre part, des paramètres hydrauliques de l'aquitard et de son épaisseur.

constante diminution des niveaux avec le temps, indiquant un déficit de l'aquifère du Sous-Rupélien.

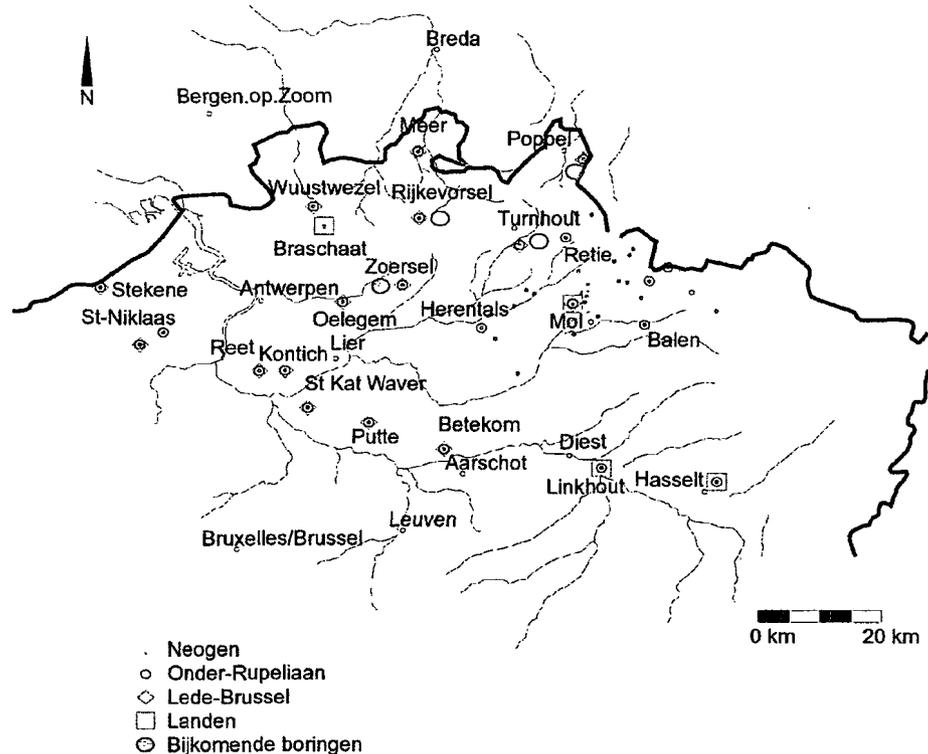


Figure 3.12 Localisation des piézomètres, y compris les quatre forages de la dernière campagne hydrogéologique (voir section 3.2.3.4).

Les écoulements d'eau au sein de l'aquifère du Néogène sont conditionnés, du fait de son régime phréatique, par la topographie et le réseau hydrographique, c'est-à-dire par le partage des bassins de l'Escaut et de la Meuse. Les écoulements sont essentiellement orientés d'est en ouest, dans la direction de drainage du bassin de l'Escaut. Pour les aquifères profonds, on retrouve cette même tendance générale d'écoulement vers l'ouest, sans pour autant que ce dernier soit conditionné par la surface topographique. La drainance verticale au sein des aquitards est généralement dirigée vers le bas. Une drainance ascendante au travers de l'Argile de Boom s'observe cependant à Oelegem, près d'Anvers, et devrait pouvoir s'observer en bordure de sa ligne d'affleurement, comme le montrent les résultats de la modélisation (voir section 3.2.4). Le gradient vertical au travers de l'Argile de Boom, c'est-à-dire la différence de pression d'eau entre l'aquifère du Néogène et celui du Sous-Rupélien, est généralement de 2 m d'eau pour 100 m d'argile. Il est plus prononcé à l'est, dans la région des failles bordières du Graben de Roermond, suggérant une perte d'eau le long des failles. L'influence potentielle de ces failles sur la piézométrie a été étudiée au moyen de variantes du modèle hydrogéologique (voir section 3.2.4.2).

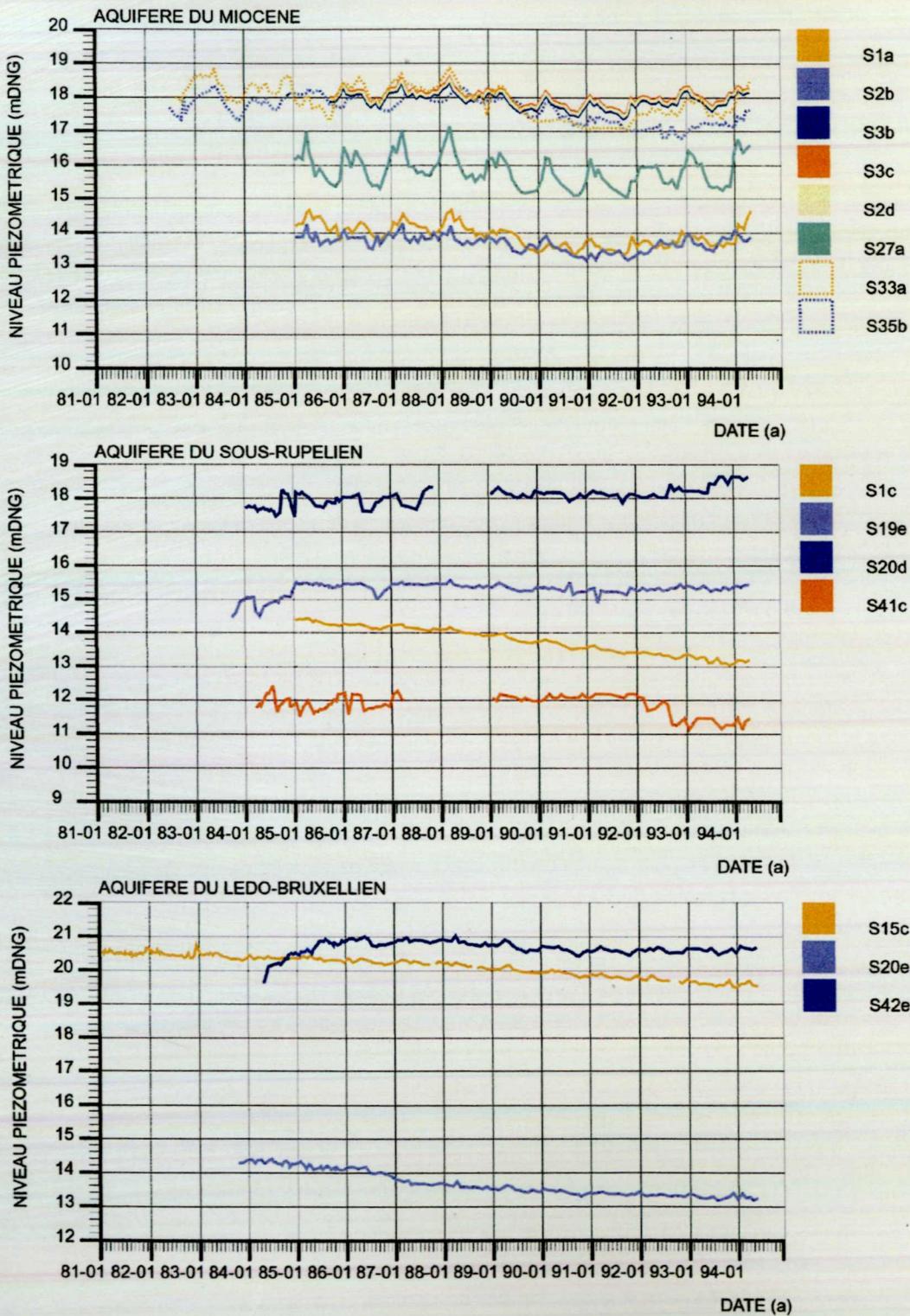


Figure 3.13 Evolution des niveaux de quelques piézomètres représentatifs de (a) l'aquifère du Néogène (Sables de Diest), (b) l'aquifère du Sous-Rupélien et (c) l'aquifère du Léo-Bruxellien.

3.2.3.3 Hydrogéochemie des aquifères

Les analyses géochimiques des eaux du Néogène montrent que celles-ci sont de type carbonaté calcique dans sa partie supérieure, c'est-à-dire avec une nette prédominance des anions HCO_3^- et CO_3^{2-} et du cation Ca^{++} , et qu'elles deviennent progressivement de type carbonaté sodique en profondeur (enrichissement en Na^+ et K^+ au détriment du Ca^{++}), tout en gardant un caractère acide et peu alcalin. Globalement, le pH et la salinité augmentent avec la profondeur dans l'aquifère du Néogène, tandis que le potentiel d'oxydoréduction diminue. Les aquifères du Sous-Rupélien et du Lédo-Bruxellien sont nettement plus riches en chlorures et en sels dissous. On note, pour la zone nucléaire de Mol-Dessel, une ressemblance marquante entre la composition chimique de l'eau de l'aquifère du Sous-Rupélien et celle de l'eau interstitielle de l'Argile de Boom (minéralité et alcalinité plus importantes par rapport au Néogène). Les données hydrogéochemiques suggèrent, pour les aquifères du Sous-Rupélien et du Lédo-Bruxellien, un mélange avec des eaux plus douces et plus récentes vers le sud-ouest et un mélange avec une eau marine en provenance du nord de la région étudiée.

L'étude des équilibres chimiques qui régissent la composition des eaux indique que les eaux des aquifères du Sous-Rupélien et du Lédo-Bruxellien sont en général en équilibre avec la phase minérale des formations, tandis que les eaux de la Formation de Berchem, située à la base de l'aquifère du Néogène, ne le sont pas.

L'âge des eaux en présence, calculé à partir des mesures de ^{14}C , est relativement récent, et toujours inférieur à 40 000 ans. Les eaux du Néogène sont vieilles de plusieurs milliers d'années à plus de 10 000 ans pour les couches les plus basales. Les eaux profondes sous l'Argile de Boom sont plus anciennes : 15 000 à 37 000 ans pour l'aquifère du Sous-Rupélien, mais seulement 6 000 à 27 000 ans pour celui du Lédo-Bruxellien. Cette différence est peut-être à mettre en liaison avec la plus grande conductivité hydraulique de ce dernier aquifère. Le caractère relativement juvénile de ces eaux a été confirmé par une étude des déséquilibres isotopiques au sein de la famille de l'uranium.

Les eaux des aquifères du Sous-Rupélien et du Lédo-Bruxellien montrent une tendance à l'augmentation en isotopes lourds de l'oxygène vers le nord, ce qui semble indiquer qu'une partie des eaux présentes se serait infiltrée dans la zone d'affleurement sous des conditions paléoclimatiques plus froides.

3.2.3.4 Caractérisation hydrodynamique

Pour affiner la caractérisation géométrique et hydrodynamique des aquifères sous-jacents à la formation-hôte — caractérisation qui constitue une des incertitudes les plus significatives de la modélisation hydrogéologique — une série de tests hydrauliques par injection et de mesures diagraphiques a été effectuée dans quatre forages spécifiques (Zoersel, Rijkevorsel, Turnhout et Weelde) réalisés entre 1996 et 1998 et complétée par des essais en laboratoire sur les carottes prélevées lors de deux de ces forages. Des essais hydrauliques ont en outre été réalisés dans les forages Dessel-1 et Mol-1 destinés aux mesures géophysiques (voir section 3.2.2.2).

Un effort particulier a été entrepris pour confirmer la valeur de la conductivité hydraulique de l'Argile de Boom obtenue sur carotte (échelle centimétrique) au moyen de tests in situ (tests par injection ou à l'obturateur) en forages (échelle métrique) ou en utilisant le petit puits adventif au laboratoire souterrain HADES comme un perméamètre à grande échelle (échelle décimétrique — voir fig. 3.25), ainsi que pour évaluer l'anisotropie de conductivité hydraulique au sein de cette formation. Dans le cadre de l'évaluation de la variabilité verticale des paramètres contrôlant la migration des radionucléides, on a établi, à partir des carottes prélevées lors du forage Mol-1, un profil des conductivités hydrauliques sur l'épaisseur totale de l'Argile de Boom. Ce profil met clairement en évidence le comportement différencié du Membre de Belsele-Waas par rapport aux autres membres de la Formation de Boom (fig. 3.39), ce que confirme de manière indirecte le profil qualitatif continu de conductivité hydraulique obtenu par diaggraphie de résonance magnétique nucléaire à l'aplomb du forage Mol-1.

L'ensemble de ces investigations donne des valeurs cohérentes de conductivité hydraulique de l'ordre de $10^{-12} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ pour la partie la plus argileuse de la formation. La table 3.5 détaille les valeurs de conductivité hydraulique pour les différents membres de la Formation de Boom. Le rapport entre les conductivités hydrauliques horizontale et verticale, déterminé sur base de mesures en cellule de perméamètre en laboratoire, est d'environ 2 pour les Membres de Putte et Terhagen. Il est très variable dans le Membre de Belsele-Waas. La porosité totale de l'Argile de Boom avoisine quant à elle les 30 à 40 %.

Table 3.5 Meilleure estimation et intervalle de confiance pour les conductivités hydrauliques horizontale et verticale de l'Argile de Boom.

	Conductivité hydraulique horizontale K_h [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]		Conductivité hydraulique verticale K_v [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	
Zone de transition	10^{-11}	10^{-12} à 10^{-10}	$6\cdot 10^{-12}$	10^{-12} à 10^{-10}
Membres de Putte et Terhagen	$6\cdot 10^{-12}$	$3\cdot 10^{-12}$ à 10^{-11}	$3\cdot 10^{-12}$	$7\cdot 10^{-13}$ à $7\cdot 10^{-12}$
Membre de Belsele-Waas	10^{-10}	10^{-12} à 10^{-9}	$6\cdot 10^{-11}$	10^{-12} à 10^{-9}

Les meilleures estimations pour les conductivités hydrauliques des unités les plus significatives sont respectivement de 2 à $3\cdot 10^{-4} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ pour l'aquifère du Néogène, de $7\cdot 10^{-13}$ à $3\cdot 10^{-7} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (K_v) et de $2\cdot 10^{-12}$ à $2\cdot 10^{-7} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (K_h) pour l'aquifère du Sous-Rupélien, de 10^{-13} à $10^{-11} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ pour l'aquitard d'Asse et de $5\cdot 10^{-11}$ à $5\cdot 10^{-6} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ pour l'aquifère du Lédobruyellien.

3.2.3.5 Perspectives

La suite du programme de recherche et développement en matière de caractérisation des unités hydrogéologiques sera définie sur base notamment des besoins de la modélisation et

des analyses de sensibilité. Outre l'entretien du, et les mesures sur, le réseau piézométrique régional, une attention particulière devra être accordée à la conductivité hydraulique à grande échelle de l'Argile de Boom, et notamment à l'influence des zones fortement perturbées par la présence de failles (bordure occidentale du Graben de Roermond) et à la possibilité, même très limitée, d'écoulement advectif dans l'Argile de Boom même, principalement au sein de la double bande silteuse. A cela s'ajoutent les points cruciaux suivants :

- amélioration de la connaissance de la géométrie et des propriétés hydrauliques des unités situées sous l'Argile de Boom ;
- évaluation du rôle joué par les couches ou lentilles semi-perméables au sein de l'aquifère du Néogène ;
- précision de l'origine, l'âge et l'évolution des eaux souterraines, et cela afin, d'une part, d'améliorer la compréhension du système et, d'autre part, de confirmer autant que possible les résultats de la modélisation hydrodynamique.

3.2.4 La modélisation hydrogéologique

La modélisation hydrogéologique vise à acquérir une bonne compréhension du régime hydraulique souterrain au sein et autour de l'Argile de Boom aux alentours de la zone nucléaire de Mol-Dessel. Elle consiste à tenter de reproduire les observations issues de la caractérisation hydrogéologique, et notamment les niveaux piézométriques et les conductivités hydrauliques, à l'aide de modèles mathématiques, afin d'obtenir des indications à la fois des écoulements souterrains dans les différentes formations géologiques et des équilibres hydrauliques entre ces compartiments. Elle se fait en lien étroit, permanent et itératif avec la caractérisation (hydro)géologique.

Les rôles de la modélisation hydrogéologique ont été précisés au cours de la période couverte par le rapport SAFIR 2. Les résultats des études relatives aux caractéristiques hydrodynamiques et de migration de l'Argile de Boom ont clairement fait apparaître que la composante advective (mouvement selon les gradients de pression d'eau) de la migration des espèces en solution au travers de cette formation est négligeable par rapport à la composante diffusive (mouvement le long des gradients chimiques) (voir section 3.5). La composante advective est par contre fondamentale dans les aquifères entourant l'Argile de Boom qui, pour rappel, ne font pas partie du système de dépôt, mais assurent la fonction de sûreté à long terme de dispersion et de dilution. La mise en évidence du caractère local des exutoires de la migration des radionucléides à partir du dépôt a permis de se focaliser, pour la migration, sur l'hydrogéologie des alentours immédiats de la zone nucléaire de Mol-Dessel (modèle local). Par conséquent, le modèle régional a été utilisé principalement pour aider à la compréhension du système hydrogéologique global et pour fournir des indications quant aux évolutions probables de ce système et à leurs conséquences, notamment suite à des modifications naturelles ou anthropogènes des conditions climatiques (réchauffement ou refroidissement) ou à l'augmentation des débits de pompage.

Du point de vue des techniques utilisées, on note, d'une part, l'introduction d'un nouveau code de calcul (MODFLOW) et, d'autre part, la subdivision du modèle régional initial en trois modèles considérant des échelles spatiales et géologiques de plus en plus réduites et ce, de manière à affiner l'influence des conditions hydrauliques et hydrogéologiques propres à la zone de Mol-Dessel.

Le modèle régional couvre à peu près tout le nord-est de la Belgique, sur une superficie de 7 000 km², et simule l'ensemble des unités hydrogéologiques (aquifères et aquitards) situées globalement entre le sommet sableux du Groupe d'Ypres et l'aquifère du Quaternaire (fig. 3.14). Grâce à son étendue géographique, il permet de tenir explicitement compte de certaines conditions aux limites naturelles, comme par exemple l'étendue des aquifères et leur alimentation (la recharge en eau météorique) dans les zones d'affleurement. Il sert par ailleurs de base pour déduire les conditions aux limites des deux autres modèles. En tenant compte des limites naturelles, le modèle régional est le mieux adapté des trois modèles aux simulations des changements des conditions climatiques et géologiques.

Le modèle sub-régional couvre une superficie totale d'environ 1 500 km² et le modèle local, une superficie de 300 km², centrée sur la zone nucléaire de Mol-Dessel (fig. 3.14). Ces deux modèles visent avant tout à étudier plus en détail les écoulements dans l'aquifère du Néogène, parce que c'est lui qui constitue l'interface entre la barrière géologique et la biosphère. En permettant d'estimer plus précisément les voies préférentielles de cheminement des radionucléides vers la biosphère, ils ont permis de mettre en évidence le caractère local des exutoires des écoulements souterrains. C'est donc le modèle local qui est utilisé directement pour les évaluations de la migration des radionucléides effectuées dans le cadre des évaluations de sûreté (voir section 4.3).

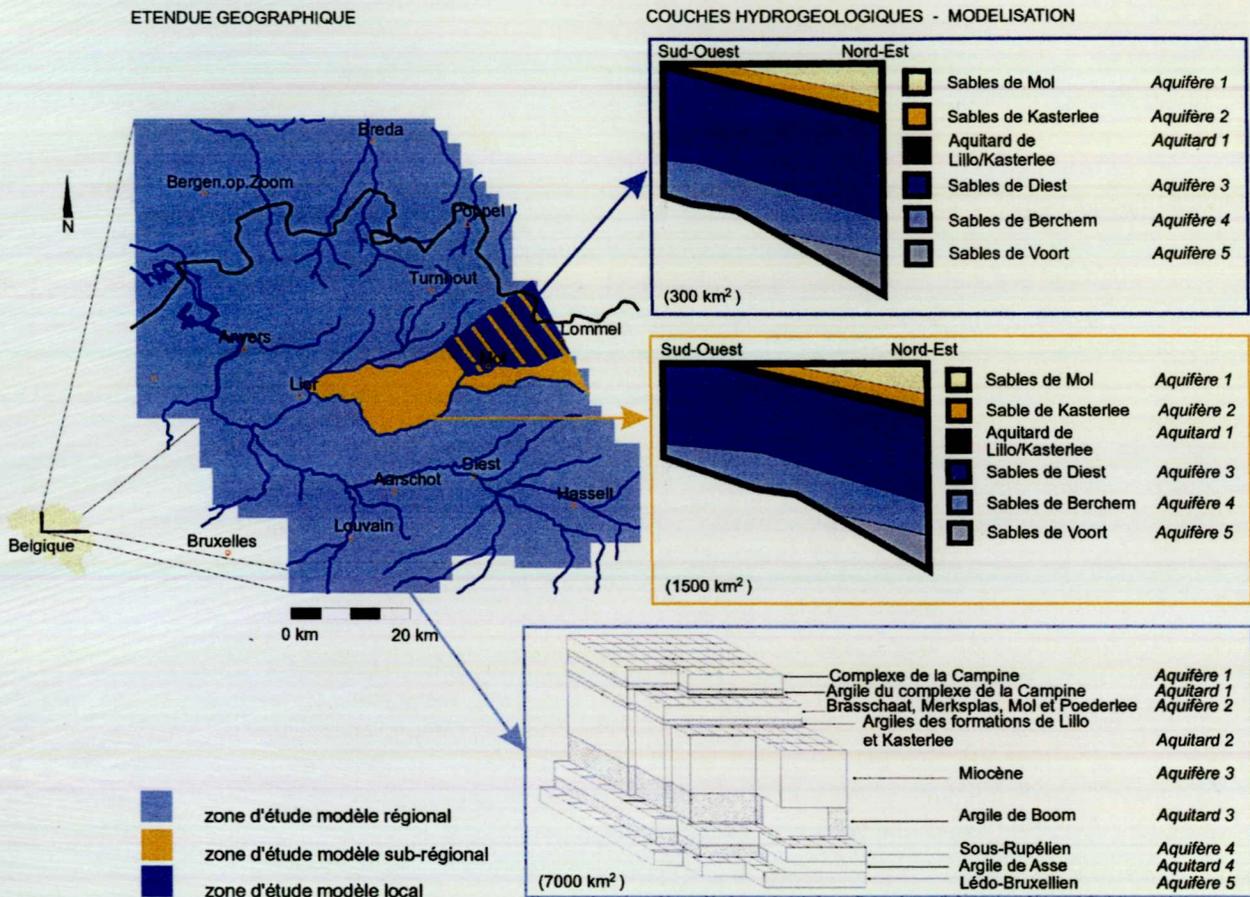


Figure 3.14 Délimitation géographique et géologique des trois modèles hydrogéologiques.

3.2.4.1 Modèles mathématiques, méthodes de résolution et codes de calcul

Tous les modèles mathématiques utilisés pour les modélisations hydrogéologiques considèrent des conditions stationnaires, c'est-à-dire que les écoulements souterrains simulés ne changent pas explicitement avec le temps. Les évolutions importantes du sens et des vitesses des écoulements qui pourraient résulter de changements climatiques ou géologiques par exemple sont à ce titre évaluées au moyen de simulations (variantes) pour lesquelles on a modifié les conditions et la valeur des paramètres des modèles. Ceci permet de se faire une idée des effets de tels changements, ce qui est cohérent avec l'approche générale d'évaluation de la sûreté radiologique à long terme, qui n'a pas pour objectif de prédire précisément le devenir du système de dépôt et de son environnement.

Le code utilisé pour le modèle régional est le code NEWSAM. Le code MODFLOW a également été utilisé pour les exercices plus récents, et en particulier pour le développement des modèles sub-régional et local. Ces deux codes, développés par le monde académique et

vérifiés par de nombreux utilisateurs, font appel à une méthode numérique basée sur les différences finies pour simuler les écoulements dans un système hydrogéologique multicouche de grande échelle. Ils supposent des écoulements essentiellement bidimensionnels, parallèlement aux aquifères, et une communication entre ceux-ci au travers des aquitards par une drainance verticale en conditions stationnaires. Dans le cadre de la modélisation sub-régionale et locale, on a obtenu une simulation quasi tridimensionnelle de l'aquifère du Néogène en le subdivisant en une série de sous-couches (aquifères et aquitards) couplées verticalement.

3.2.4.2 Modèle régional

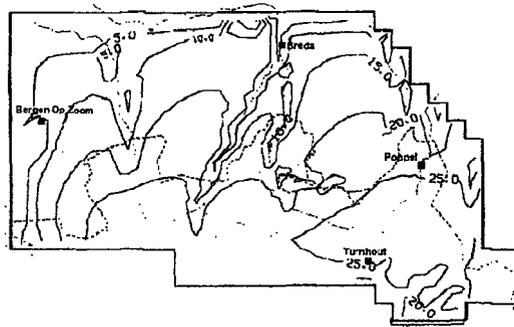
Le point de départ des études consacrées ces dix dernières années au système hydrogéologique régional est le modèle établi à l'aide du code NEWSAM, mis au point en 1984. La version actuellement utilisée de ce modèle est celle de 1994 (fig. 3.14), construite à l'aide du même code. Dans cette dernière version, l'aquifère du Néogène est subdivisé en trois sous-unités distinctes (respectivement les aquifères du Quaternaire, du Pliocène et du Miocène), séparées par deux couches argileuses de faible épaisseur dont la résistance à l'écoulement est relativement faible, ce qui permet un contact hydraulique entre les différentes unités aquifères.

Plusieurs simulations du système hydrogéologique ont été réalisées au moyen du modèle régional révisé, de manière à obtenir une bonne représentation des niveaux piézométriques au sein de l'aquifère du Néogène (fig. 3.15). C'est cette version qui a été utilisée comme référence pour les simulations suivantes.

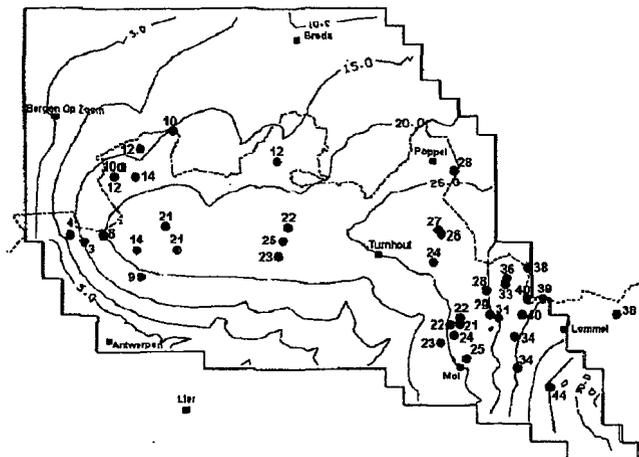
Comme on ignore la continuité de la couche d'argile que constitue l'aquitard de Lillo-Kasterlee dans la partie orientale de la région étudiée, plusieurs variantes du modèle de référence ont été testées afin d'analyser l'efficacité de la séparation des aquifères du Pliocène et du Miocène. Elles ont montré qu'une diminution du caractère isolant de l'aquitard n'a pas d'effet majeur sur la piézométrie des aquifères en question à l'échelle régionale.

Les résultats de la modélisation montrent que, pour les aquifères du Sous-Rupélien et du Léo-Bruxellien, l'alimentation, qui vient essentiellement du sud, est déviée en des flux dirigés d'est en ouest, et qu'une alimentation additionnelle est envisageable. L'approche par analyse de variantes du modèle régional de référence a aussi été suivie afin d'améliorer la représentativité des résultats de la modélisation relative aux aquifères situés sous l'aquitard de Boom, dont la piézométrie, calculée au moyen de la version de référence du modèle, ne correspondait pas adéquatement aux observations (fig. 3.16).

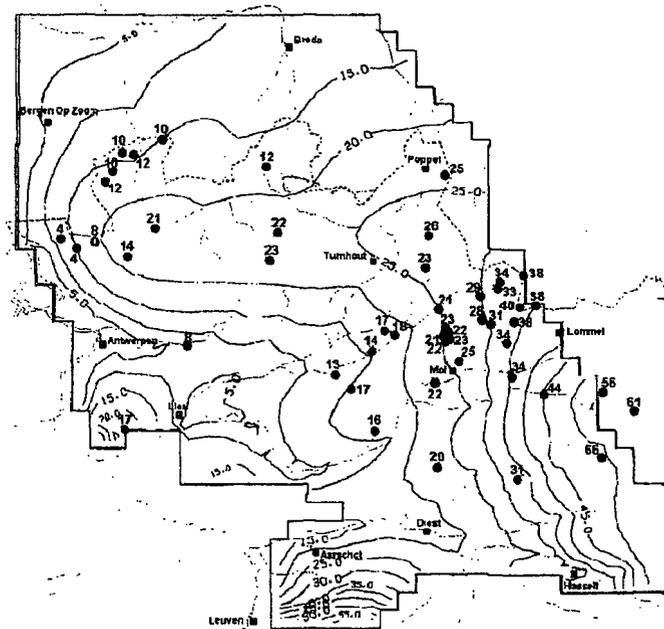
QUATERNAIRE



PLIOCENE



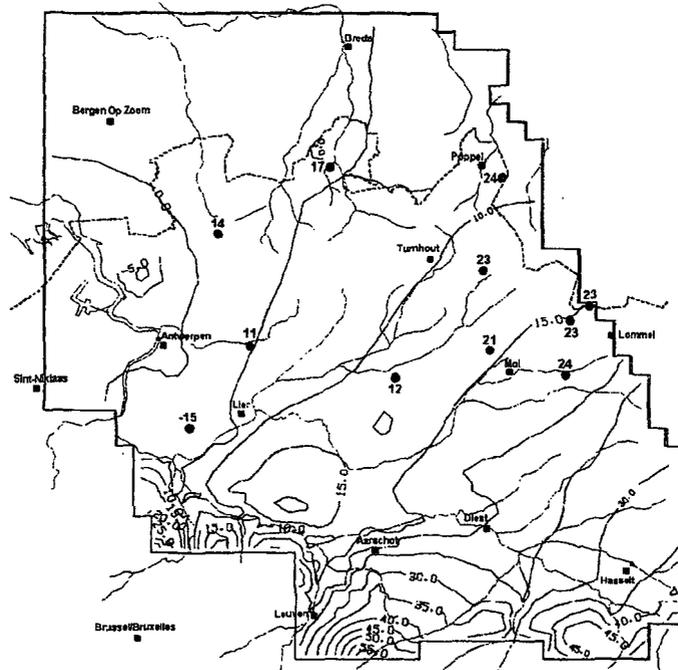
MIOCENE



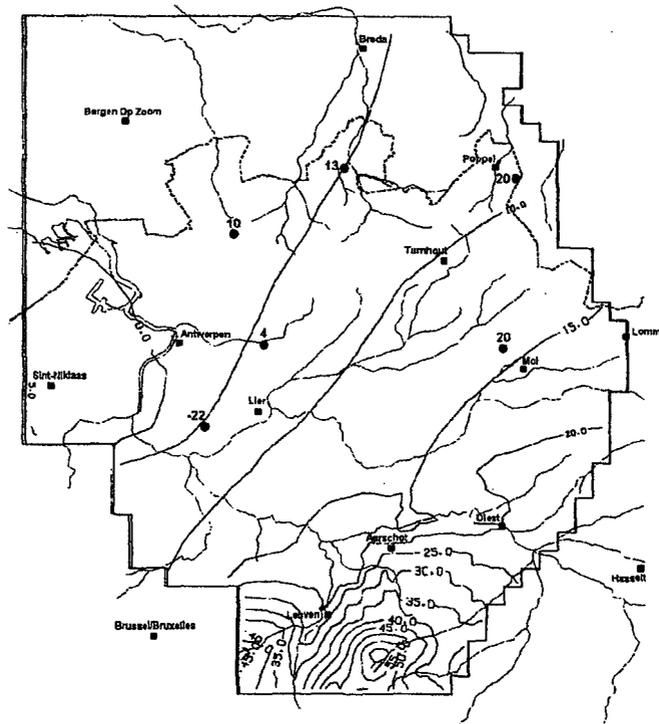
● Potentiel mesuré

Figure 3.15 Piézométrie des aquifères du Néogène calculée avec la version de référence du modèle régional (des potentiels mesurés en des points précis peuvent être comparés aux lignes d'isopotential calculées).

SOUS-RUPELIEN



LEDO-BRUXELLIEN



● Potentiel mesuré

Figure 3.16 Piézométrie des aquifères du Sous-Rupélien et du Léo-Bruxellien calculée avec la version de référence du modèle régional (des potentiels mesurés en des points précis peuvent être comparés aux lignes d'isopotential calculées).

Pour les aquifères sous-jacents à l'Argile de Boom, plusieurs types de variantes permettant un apport d'eau supplémentaire (de manière à en élever le niveau piézométrique) ont été étudiées, dont les plus significatives sont les suivantes :

- l'augmentation de la conductivité hydraulique globale de l'Argile de Boom ;
- le contact hydraulique local entre les aquifères du Miocène et du Sous-Rupélien via des failles situées à l'est. Ces failles ont été modélisées comme des zones possédant localement une plus grande conductivité hydraulique (bien que la piézométrie mesurée dans ces zones indique un gradient hydraulique plus élevé sur l'épaisseur de l'Argile de Boom).

Les résultats obtenus avec ces variantes sous-estiment encore la piézométrie des aquifères du Sous-Rupélien et du Léo-Bruxellien. La meilleure correspondance entre résultats de la modélisation et observations a été obtenue en imposant à la conductivité hydraulique de l'Argile de Boom une valeur de $10^{-10} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, soit une conductivité hydraulique nettement plus élevée que celle mesurée sur et dans les environs de la zone nucléaire de Mol-Dessel.

En outre, on a pu montrer au moyen d'études de sensibilité l'influence significative de faibles modifications de la valeur de la conductivité hydraulique de l'aquifère du Sous-Rupélien sur la piézométrie calculée. A ce stade de l'étude, il était donc clair que les incertitudes sur la géométrie et les propriétés hydrauliques des aquifères profonds étaient telles qu'il était impossible de poursuivre l'exercice de modélisation et, en particulier, de calibration, sans un effort complémentaire de caractérisation de ces aquifères. Cette constatation a mené à la réalisation des quatre forages de Zoersel, Rijkevorsel, Turnhout et Weelde (voir section 3.2.3.4). Les résultats de cette campagne de reconnaissance hydrogéologique seront utilisés pour la nouvelle itération de la modélisation régionale, prévue en 2002.

Etant donné les échelles de temps considérées dans les évaluations de sûreté d'un projet tel que celui de la mise en dépôt en profondeur de déchets radioactifs, il est important de considérer les évolutions possibles sur de longues périodes du système de dépôt et de son environnement et, notamment, des évolutions des écoulements d'eau. L'influence des diverses évolutions possibles sur le gradient hydraulique à travers l'Argile de Boom et sur la vitesse moyenne d'écoulement au sein de l'aquifère du Néogène a été analysée au moyen des modèles de 1984 et de 1994. Les évolutions étudiées (table 3.6) tiennent notamment compte des variations du système hydrogéologique en réponse aux variations climatiques naturelles et considèrent en particulier les modifications de l'infiltration et des niveaux marins, ainsi que le surcreusement des rivières qui en résulte. Les résultats de ces études n'ont pas encore été totalement intégrés dans les analyses de scénarios nécessaires aux évaluations de la sûreté radiologique à long terme (voir chapitre 4).

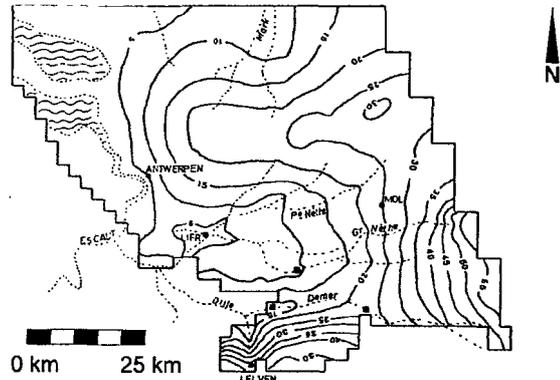
Table 3.6 Aperçu des évolutions hydrogéologiques possibles considérées.

Evolutions	Modification imposée au système hydrogéologique
Climat	Augmentation des précipitations et de l'infiltration résultante Diminution des précipitations météoriques (sécheresse)
Eustatisme	Remontée du niveau de la mer
Erosion sous-marine	Chenal d'érosion atteignant l'Argile de Boom
Dénudation	Abaissement général de la topographie
Erosion fluviale	Incision des rivières
Diapirisme	Décompaction de l'Argile de Boom

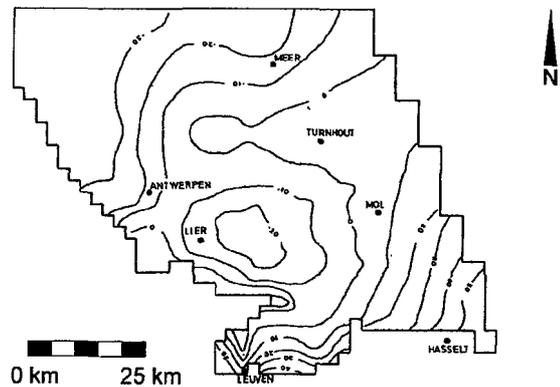
Les simulations ont été réalisées en gardant un état stationnaire et en respectant le réseau hydrographique actuel, jugeant que l'introduction dans le modèle de modifications de ce réseau eut été trop arbitraire. Ces simulations indiquent que ce sont les scénarios de sécheresse et d'érosion fluviale qui engendrent les plus grandes modifications de l'écoulement.

- Dans le cas d'une sécheresse, les niveaux piézométriques sont fortement abaissés, et ce de manière différentielle sur la région étudiée, ce qui résulte en des gradients plus faibles au sein de l'aquifère du Néogène (fig. 3.17). Pour le Sous-Rupélien, on observe des abaissements moindres. D'une manière générale, les aquifères ne sont plus drainés que sur une section très réduite de leur zone d'affleurement, en aval des rivières, près de leur confluence avec l'Escaut, c'est-à-dire à l'ouest. La drainance au travers de l'Argile de Boom est diminuée, voire inversée ; ainsi, on observe des mouvements ascendants dans la région de Mol-Dessel.
- Dans le cas d'une érosion fluviale, provoquée par un abaissement du niveau de la mer, l'écoulement est fort influencé par la dépression locale provoquée par l'incision des rivières (fig. 3.18).
- Les phénomènes rendant l'Argile de Boom localement plus perméable tels que la présence d'un chenal d'érosion sous-marine ou une décompaction de l'argile par diapirisme n'ont qu'un effet local sur l'écoulement.

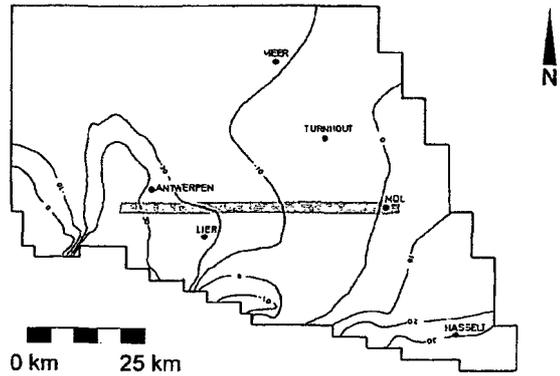
NEOGENE (REFERENCE)



NEOGENE (MODIFICATION)



SOUS-RUPELIEN (REFERENCE)



SOUS-RUPELIEN (MODIFICATION)

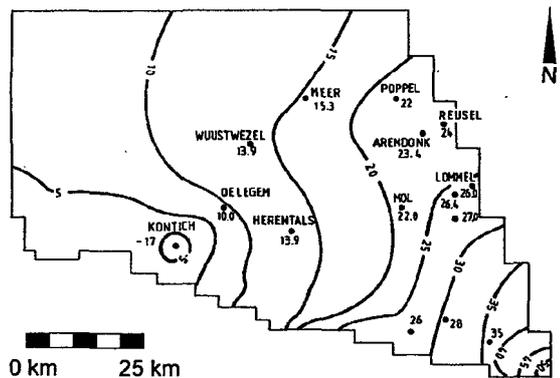
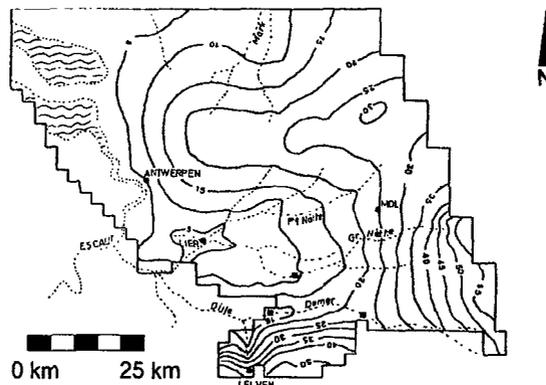
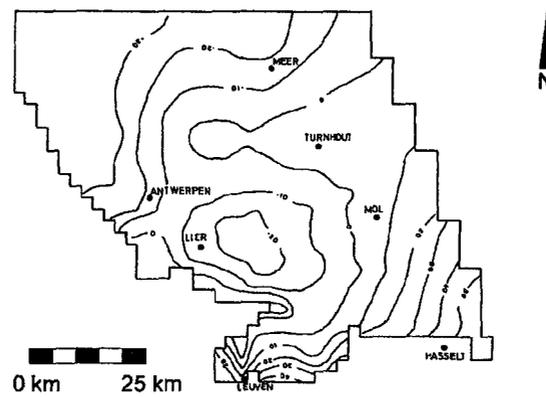


Figure 3.17 Impact d'une réduction de l'infiltration par un facteur 3 (sécheresse) sur la piézométrie du Néogène (a : situation de référence ; b : modification) et du Sous-Rupélien (c : situation de référence ; d : modification).

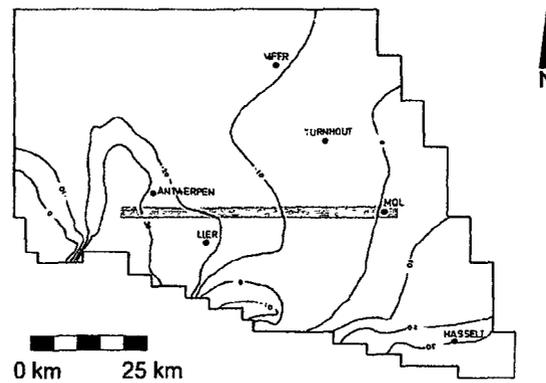
NEOGENE (REFERENCE)



NEOGENE (MODIFICATION)



SOUS-RUPELIEN (REFERENCE)



SOUS-RUPELIEN (MODIFICATION)

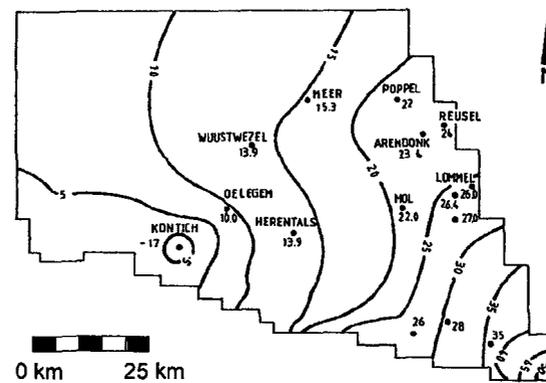


Figure 3.18 Impact d'une érosion fluviale provoquée par un abaissement du niveau de la mer sur la piézométrie du Néogène (a : situation de référence ; b : modification) et du Sous-Rupélien (c : situation de référence ; d : modification).

L'évolution climatique naturelle probable pour les 125 000 prochaines années, traduite en des variations d'infiltration significatives, résulte en une inversion du gradient hydraulique vertical de l'Argile de Boom, avec une valeur identique ou doublée selon la rigueur du climat, et des diminutions de vitesses d'écoulement dans les aquifères.

Une prise en compte plus détaillée de ces phénomènes climatiques et l'évaluation de leur impact sur le système hydrogéologique n'ont pas encore pu être réalisées car un tel exercice implique

- soit une nouvelle conceptualisation du système hydrogéologique qui dépasse les limites géographiques du modèle régional existant ;
- soit une adaptation trop arbitraire de la géométrie des couches et du réseau hydrographique. C'est le cas pour l'occurrence d'une glaciation avec soit la présence de sol gelé en permanence (permafrost), qui viendrait à modifier les infiltrations, soit une extension de la calotte glaciaire jusque dans le nord de la Belgique. Quoique ce dernier scénario soit a priori moins probable, il pourrait engendrer une érosion sous-glaciaire importante qui, combinée aux autres conséquences climatiques, modifierait fortement le paysage et l'hydrogéologie. La prise en compte d'une subsidence ou d'un soulèvement continental nécessiterait elle aussi une redéfinition du réseau hydrographique.

3.2.4.3 Modèle sub-régional

Pour étudier l'aquifère du Néogène plus en détail, on a extrait du modèle régional un modèle plus réduit en superficie (1 500 km²) et en nombre de couches géologiques : le modèle sub-régional. L'aquifère du Néogène y est divisé en cinq aquifères, en bon contact hydraulique les uns avec les autres (fig. 3.14). Sa limite inférieure est formée par le sommet de l'aquitard de Boom.

Contrairement aux simulations du modèle régional, les simulations du modèle sub-régional ont utilisé le nouveau code MODFLOW. Etant donné que le modèle sub-régional considère plus de couches aquifères dans le Néogène que le modèle régional et que leur modélisation est quasi tridimensionnelle, les conditions aux limites du modèle régional n'étaient pas utilisables. Comme conditions aux limites, on a donc autant que possible utilisé des lignes de séparation des eaux naturelles, comme la Grande Nèthe et la Petite Nèthe, ainsi que la ligne de séparation entre les bassins de l'Escaut et de la Meuse.

Le modèle sub-régional a été utilisé, d'une part, pour calculer la piézométrie au sein de l'aquifère du Néogène (fig. 3.19) et la comparer aux mesures et, d'autre part, pour étudier, au moyen d'une étude de sensibilité, les trois types d'incertitudes suivants relatifs à l'aquifère du Néogène :

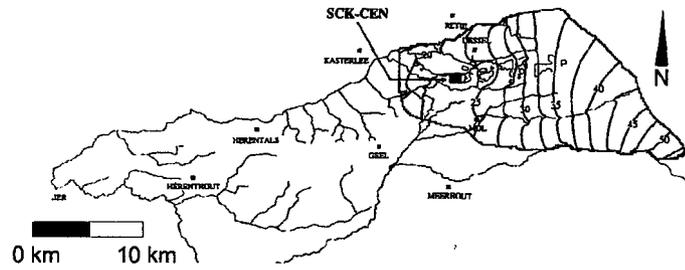
- le rôle joué par l'aquitard de Lillo-Kasterlee (voir aussi le modèle régional) ;
- la présence ou l'absence de dépôts du Quaternaire (étudiées de manière indirecte en modifiant les propriétés des Sables de Mol) ;
- l'influence des rivières sur la piézométrie.

Les deux conclusions principales de ces études sont, d'une part, que la piézométrie est influencée avant tout par les changements du contact hydraulique entre les rivières et les eaux souterraines et, d'autre part, que la présence de la couche argileuse de Lillo-Kasterlee entre les Sables de Diest et de Kasterlee influence davantage les écoulements que son épaisseur exacte.

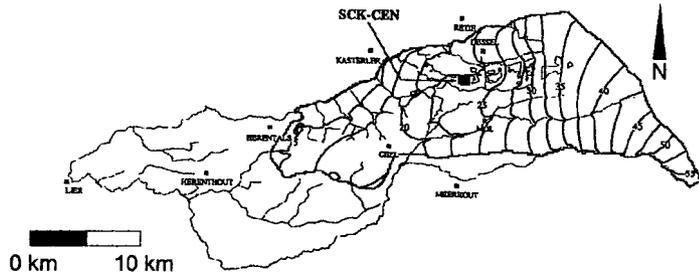
Le modèle sub-régional a par ailleurs permis d'effectuer une première détermination de la trajectoire des particules d'eau (*particle tracking*) quittant l'Argile de Boom à l'aplomb d'une installation de dépôt située sous la zone nucléaire de Mol-Dessel. Les résultats indiquent que toutes les trajectoires se dirigent vers la Nèthe Blanche et la Petite Nèthe ; elles restent donc relativement bien localisées aux alentours du site de référence. (Ces résultats sont entièrement analogues à ceux de la détermination des trajectoires effectuée avec le modèle local (fig. 3.20).) La présence de la couche argileuse de Lillo-Kasterlee induit un retard des écoulements et modifie les trajectoires verticales tout en gardant les mêmes exutoires.

NIVEAUX PIEZOMETRIQUES [mDNG]

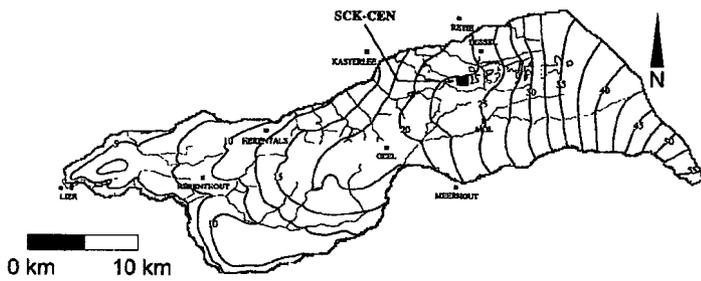
COUCHE 1



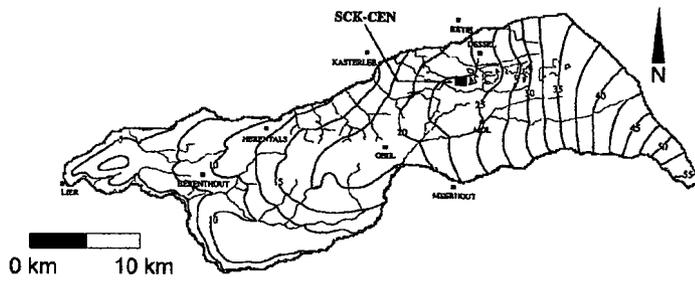
COUCHE 2



COUCHE 3



COUCHE 4



COUCHE 5

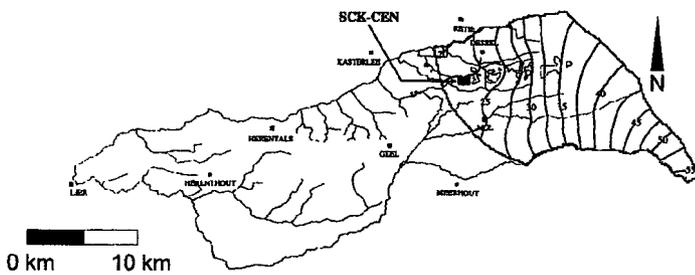


Figure 3.19 Piézométrie obtenue avec le modèle sub-régional.

3.2.4.4 Modèle local

Les conclusions quant au caractère local des exutoires obtenues avec le modèle sub-régional ont conduit à développer un modèle local, permettant une discrétisation plus fine tout en étant utilisable pour les calculs de migration nécessaires aux évaluations de la sûreté radiologique à long terme (voir section 4.3.2). Ce modèle utilise le même code de calcul que le modèle sub-régional et considère le même nombre de couches géologiques et les mêmes conditions aux limites. Les trajectoires des particules d'eau depuis le site de référence sous la zone nucléaire de Mol-Dessel confirment le caractère local des exutoires possibles (fig. 3.20). Ceci est un des acquis importants du programme de recherche et développement 1990–2000 en matière d'hydrogéologie.

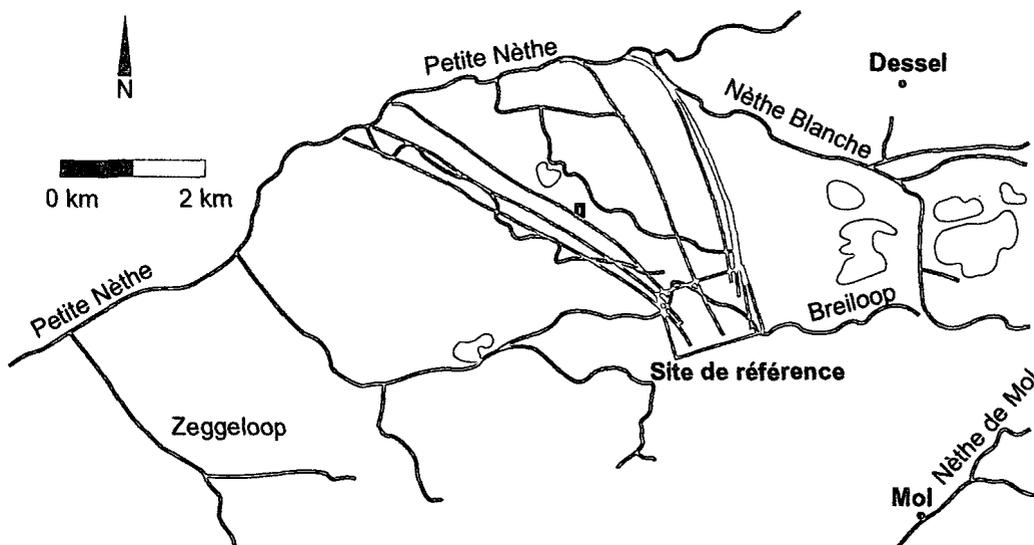


Figure 3.20 Détermination, grâce au modèle local, des trajectoires des particules d'eau qui quittent le site de référence par le haut.

3.2.4.5 Perspectives et recommandations

Afin de tenter de lever l'incohérence constatée entre les valeurs de conductivité hydraulique de l'Argile de Boom mesurées localement ($10^{-12} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) et celles issues d'une des variantes de la modélisation hydrogéologique régionale ($10^{-10} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; voir section 3.2.4.2), et de manière à pouvoir définir la suite éventuelle à donner au programme de caractérisation géologique et hydrogéologique de la formation-hôte et de son environnement, priorité a été donnée à la poursuite des exercices de modélisation hydrogéologique et, en particulier,

- au développement d'une nouvelle version du modèle hydrogéologique régional, de manière notamment à prendre en compte de façon explicite les aquitards ainsi qu'à considérer les hétérogénéités verticales et horizontales de conductivité hydraulique au sein de l'Argile de Boom et de l'aquifère du Sous-Rupélien, ce qui nécessitera l'évaluation

des possibilités d'extrapolation dans l'espace et d'une échelle à l'autre des mesures de conductivité hydraulique ;

- à l'amélioration de la calibration du modèle régional via une meilleure évaluation des entrées et sorties en eau (recharge météorique, prélèvements d'eau souterraine, court-circuit via faille), ce qui devrait aussi permettre d'analyser la sensibilité du système hydrogéologique aux perturbations engendrées par les pompages ;
- au renforcement de l'intégration des trois modèles hydrogéologiques, notamment par une harmonisation des codes de calcul et des conditions aux limites ;
- à la confirmation de l'influence des rivières sur les écoulements d'eau dans l'ensemble de l'aquifère du Néogène ainsi que du caractère local des exutoires des écoulements entre l'Argile de Boom et la biosphère.

Des études hydrogéo-chimiques pourraient en outre aider à vérifier les résultats des modèles hydrogéologiques. A terme, un couplage entre écoulements et hydrogéo-chimie est envisageable.

Enfin, l'analyse des modifications des écoulements d'eau et de l'hydrogéo-chimie de l'Argile de Boom et de ses encaissants qui pourraient résulter de changements des conditions environnementales — comme des modifications climatiques pouvant conduire à des conditions glaciaires ou périglaciaires (permafrost) ou, au contraire, à un réchauffement, et ainsi à une augmentation des niveaux marins — doit être poursuivie, car c'est un des fondements de l'analyse des scénarios d'évolution à long terme du système de dépôt et de son environnement, nécessaire aux évaluations de sûreté (voir chapitre 4).

3.3 L'installation de dépôt en profondeur

L'architecture de référence de l'installation de dépôt en profondeur développée en Belgique, soit la géométrie de l'installation et les matériaux utilisés pour sa construction, a été adaptée en fonction notamment des recommandations de la Commission d'évaluation SAFIR (1990). Ses bases conceptuelles principales sont la satisfaction de l'ensemble des exigences de sûreté et, en particulier, des fonctions de sûreté à long terme (voir section 2.2), ainsi que des exigences propres à la formation-hôte à la profondeur envisagée, en l'occurrence l'Argile de Boom à l'aplomb de la zone nucléaire de Mol-Dessel (voir section 2.3), ce site étant non pas un site de dépôt, mais bien un site de référence pour la recherche et développement méthodologique (voir section 3.2.1). Toujours en évolution, l'architecture de référence n'a concerné dans un premier temps que les déchets vitrifiés, puisque l'hypothèse qui prévalait jusqu'au rapport SAFIR, à savoir le retraitement complet de l'ensemble des combustibles usés, faisait des déchets vitrifiés la classe de déchets la plus contraignante en termes radiologiques et thermiques : c'est donc pour ces déchets qu'elle est aujourd'hui au stade de développement le plus avancé. Certains de ses aspects ont été modifiés par la suite, mais de façon encore préliminaire, afin de prendre en compte les spécificités des combustibles usés. Enfin, l'extension de l'architecture de dépôt aux autres classes ou ensembles de classes de déchets du groupe géologique est prévue dans une phase ultérieure. A terme, l'architecture de l'ensemble du dépôt final regroupera les solutions développées pour chaque classe ou groupe cohérent de classes de déchets, au sein d'un système de dépôt considéré par hypothèse comme unique.

La conception de l'installation de dépôt en profondeur se fonde autant que possible sur l'utilisation de matériaux connus et de techniques courantes et suffisamment éprouvées ; elle ne préjuge en rien du développement de nouvelles technologies ou de l'amélioration de celles qui sont actuellement disponibles. Elle s'appuie également sur l'expérience accumulée au fur et à mesure de la construction du laboratoire souterrain HADES dans l'Argile de Boom à Mol, et bénéficiera particulièrement des enseignements tirés de l'expérience de démonstration en vraie grandeur PRACLAY, actuellement en cours de préparation. Bien entendu, architecture de dépôt et exploitation du dépôt sont également étroitement liées.

3.3.1 L'architecture de référence

L'architecture de référence de l'installation de dépôt en profondeur développée en Belgique se présente comme un réseau de galeries rectilignes situé dans le plan médian de la couche d'Argile de Boom, à environ 240 mètres sous la surface. Deux puits d'environ 6 mètres de diamètre utile, reliés à leur base par une galerie de connexion de 400 mètres de long et 2 mètres de diamètre, qui sert également de galerie de secours, donnent accès à deux galeries principales de 3.5 mètres de diamètre perpendiculaires à la galerie de connexion. Sur cette colonne vertébrale en forme de H s'articulent les galeries de dépôt, aussi appelées galeries d'enfouissement, destinées à recevoir les déchets radioactifs : d'un côté de la galerie de connexion, celles pour les déchets vitrifiés et les combustibles usés, et, de l'autre, celles pour les autres déchets du groupe géologique. Le plan de l'installation de dépôt suit la pente

de la couche d'argile, qui est de 1 à 2 %, ce qui peut se faire en orientant les galeries principales (respectivement les galeries de dépôt) suivant cette pente et en orientant les galeries de dépôt (respectivement les galeries principales) horizontalement dans le plan médian de la couche d'argile, voire en combinant ces deux possibilités. Le choix des diamètres des galeries et des puits résulte de considérations à la fois pratiques, techniques, économiques et de sûreté : ils doivent être assez grands pour permettre l'acheminement des matériaux de construction et de remblayage ainsi que des colis de déchets aux cadences souhaitées, sans pour autant être surdimensionnés, ce qui augmenterait inutilement la zone d'argile perturbée par l'excavation et augmenterait les coûts de construction et de remblayage.

L'architecture de référence actuelle présente quelques différences conceptuelles fondamentales par rapport à l'architecture de dépôt proposée dans le rapport SAFIR :

- la *séparation* des déchets vitrifiés et des combustibles usés des autres déchets du groupe géologique, pour éviter des interactions physicochimiques potentiellement préjudiciables à la sûreté à long terme (augmentation de la robustesse), pour faciliter les calculs thermiques et, plus généralement, pour permettre des évaluations de sûreté plus convaincantes ;
- l'utilisation d'*emballages étanches* suffisamment résistants à la corrosion pour les colis primaires de déchets vitrifiés (les suremballages, fig. 3.21) et les combustibles usés, afin d'assurer la fonction de confinement physique des radionucléides au minimum durant la phase thermique du système de dépôt, et ainsi éviter de devoir considérer les *phénomènes complexes d'interactions entre constituants et de migration des radionucléides* sous un gradient de température (augmentation de la robustesse). La phase thermique, c'est-à-dire la période pendant laquelle la présence des déchets impose dans le champ proche un gradient thermique de plus d'une dizaine de degrés par rapport à la température de l'argile non perturbée (environ 16°C), est d'environ 300 ans pour les déchets vitrifiés et d'environ 2 000 ans pour les combustibles usés de type UO₂.
- l'utilisation de *tubes de dépôt* (aussi appelés tubes d'enfouissement) étanches suffisamment résistants à la corrosion, pour faciliter la mise en place des déchets vitrifiés et des combustibles usés dans les galeries de dépôt.

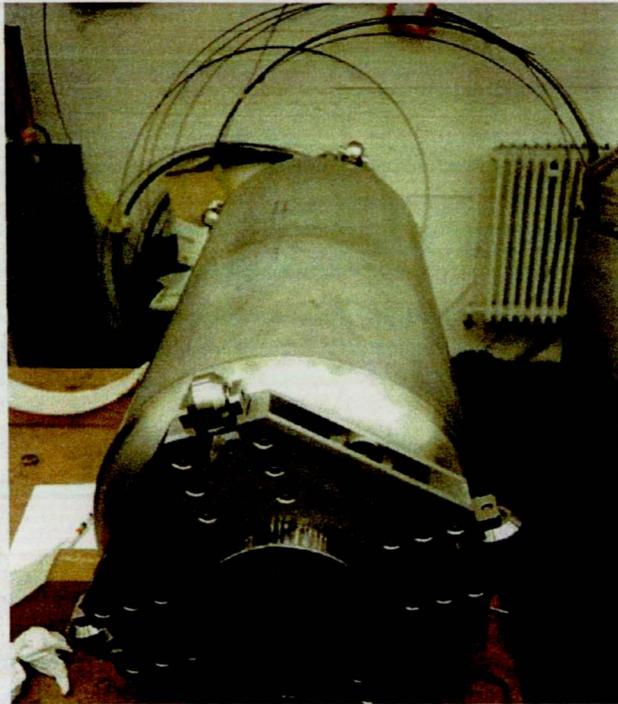


Figure 3.21 Le suremballage utilisé pour les démonstrations dans le hall PRACLAY

L'architecture de référence pour les *déchets vitrifiés* (fig. 3.22) fait l'hypothèse d'un total de 3915 colis à mettre en dépôt, soit 420 colis correspondant aux contrats de retraitement existants et 3495 colis qui résulteraient d'éventuels nouveaux contrats. (Si la Belgique écarte définitivement l'option du retraitement, les déchets vitrifiés existants seront intégrés dans la solution de dépôt développée pour les combustibles usés.) Dans le cas de déchets vitrifiés, les deux galeries principales desservent à angle droit huit galeries de dépôt de 800 mètres de long et 2 mètres de diamètre. Celles-ci sont découpées en trois segments : deux segments de 200 mètres à l'extérieur des galeries principales et un de 400 mètres entre elles. La première est située à 100 mètres de la galerie de connexion ; les suivantes sont espacées de 40 mètres, afin que l'augmentation moyenne de température dans l'aquifère du Néogène, fixée à 6°C par l'ONDRAF en l'absence de norme légale, soit respectée. L'installation destinée à la mise en dépôt des déchets vitrifiés occuperait donc une superficie de 0.224 km².

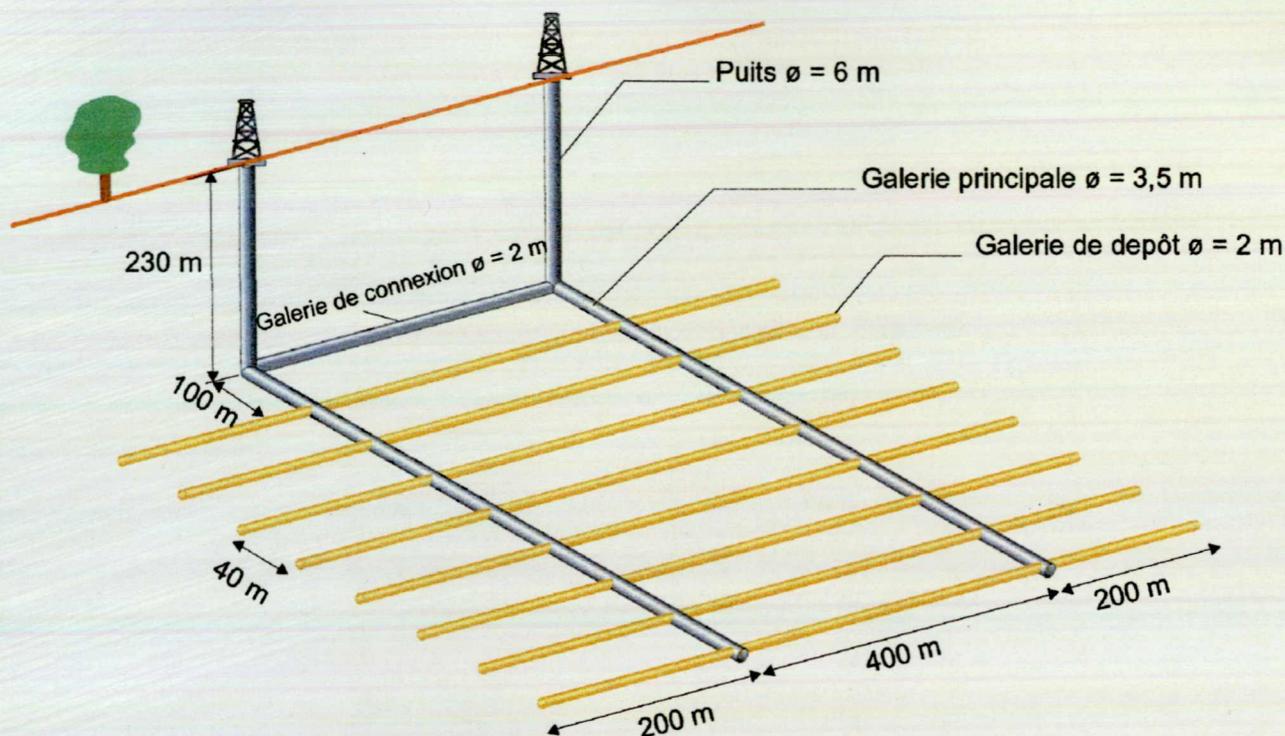


Figure 3.22 L'architecture de référence de dépôt en profondeur pour les déchets vitrifiés.

Conformément au principe des barrières multiples, la conception des galeries de dépôt prévoit une succession d'enveloppes concentriques — les barrières ouvragées — autour des colis de déchets (fig. 3.23). Concrètement, le colis primaire de déchets vitrifiés entouré de son suremballage est poussé dans un tube en acier inoxydable, dit « tube de dépôt », centré sur l'axe de la galerie. Les suremballages sont munis à chaque extrémité de quatre roues montées à 90°, dotées de freins permanents de façon à éviter tout déplacement intempestif des colis, ainsi que d'une tête de préhension montée axialement à une de leurs extrémités. Chaque tube de dépôt est formé de tronçons soudés de façon étanche les uns aux autres afin d'éviter que l'eau n'entre en contact avec les déchets, ce qui pourrait générer de la vapeur et divers phénomènes géochimiques. L'espace entre le tube et le revêtement de la galerie a préalablement été comblé avec un matériau de remblayage hydraté naturellement ou, si nécessaire, artificiellement avant mise en place des déchets, afin notamment de provoquer son gonflement et d'ainsi combler les vides interstitiels. Ce matériau est fait de blocs préfabriqués d'un mélange d'argile de type bentonitique (argile FoCa, un produit naturel constitué à 80 % d'une argile gonflante), de sable, et de graphite afin d'augmenter la conductivité thermique du mélange et ainsi de mieux évacuer la chaleur émise par les déchets. Chaque tube est fermé, du côté de la galerie principale, par une vanne de blindage provisoire destinée à protéger les opérateurs contre les rayonnements ionisants émis par les colis déjà en place, et qui peut être remplacée par un système permanent quand le tube est plein. Une fois remplie, chaque galerie de dépôt est en outre fermée par un bouchon à base

d'argile gonflante FoCa et par un bouchon destiné à contrer la pression de gonflement. Enfin, les parois des galeries, ainsi que celles des puits d'accès, sont revêtues de blocs de béton préfabriqués.

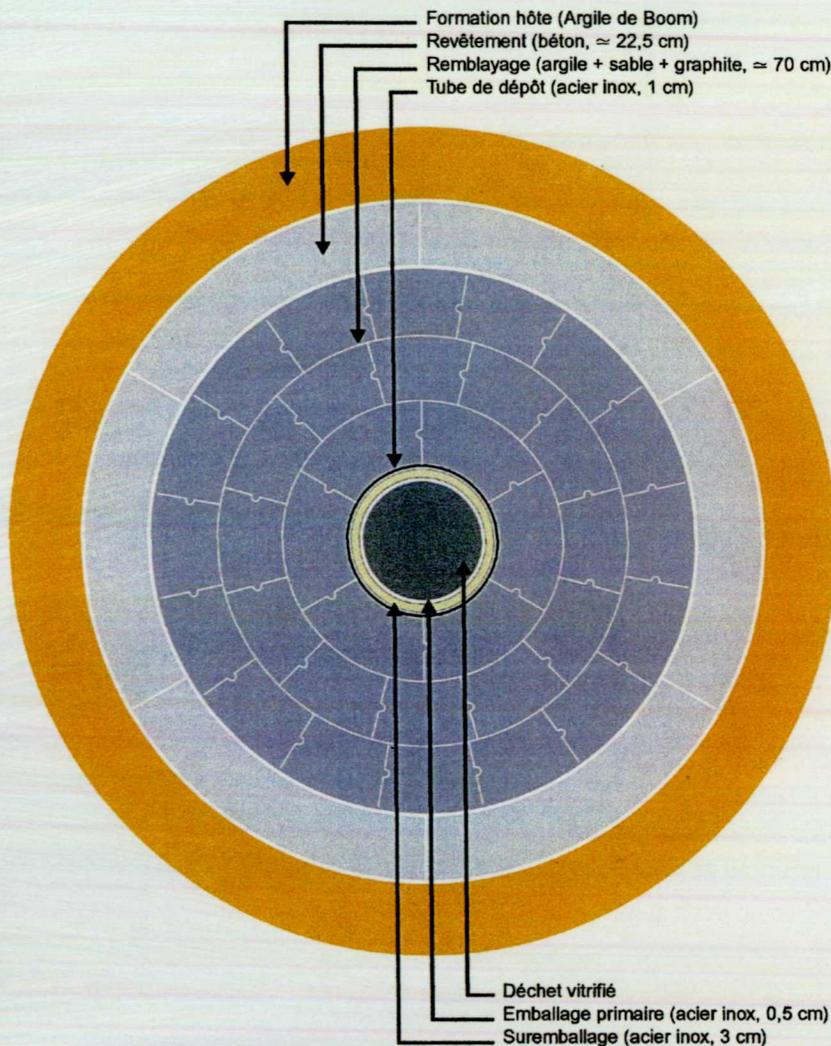


Figure 3.23 Coupe transversale d'une galerie de dépôt pour déchets vitrifiés montrant le principe des barrières multiples.

L'architecture de référence relative au dépôt des *combustibles usés* (fig. 3.24) résulte d'une extrapolation de l'architecture développée pour les déchets vitrifiés afin de l'adapter à des colis plus longs (5 mètres au lieu de 1.6 mètre) et qui refroidissent moins vite. Les différences principales sont les suivantes :

- pour faciliter le transport de colis plus longs, diminution de l'angle entre galeries principales et galeries de dépôt (45° au lieu de 90°) ;

- pour éviter que la température moyenne dans l'aquifère du Néogène n'augmente de plus de 6°C, espacement des galeries (110 mètres au lieu de 40 mètres) ;
- pour éviter que la température moyenne dans l'aquifère du Néogène n'augmente de plus de 6°C, ajustement du nombre de colis à la puissance calorifique acceptée par mètre courant de galerie (quatre tubes de dépôt par galerie pour le combustible UO₂, placés en carré autour de l'axe de la galerie ; un seul dans le cas de combustible MOX, centré sur l'axe de la galerie).

Le réseau de galeries comprendrait 800 mètres de galeries pour les 420 suremballages de déchets vitrifiés et 10.8 km de galeries pour les 9859 assemblages de combustible usé attendus. Il occuperait donc une superficie d'environ 1.3 km².

Les différents composants de l'installation de dépôt remplissent chacun un ou plusieurs rôles (table 3.7 et fig. 2.5). Certains assurent les fonctions de sûreté de confinement physique et de retard et d'étalement du relâchement et sont pris en compte dans les évaluations de la sûreté radiologique à long terme, c'est-à-dire de la sûreté radiologique après la fermeture du dépôt (voir chapitre 4) : ce sont les matrices de conditionnement (verre et UO₂) pour le retard à la lixiviation (fonction R1) qu'elles induisent, le suremballage pour son étanchéité (fonction C1), ainsi que le matériau de scellement des galeries et des puits, qui retient les radionucléides (fonction R2). D'autres, comme l'emballage primaire et le tube de dépôt, ont un rôle de sûreté à court terme, et potentiellement à plus long terme. Leur contribution — réelle — à la sûreté n'est pas prise en compte dans les évaluations de sûreté : elle représente en quelque sorte une réserve de sûreté. Certains enfin sont nécessaires pour assurer la stabilité mécanique du dépôt et, partant, de la formation-hôte (comme le revêtement des galeries et des puits et le matériau de remblayage), permettre la mise en place des déchets (comme le tube de dépôt) ou assurer la sûreté opérationnelle (comme le système de fermeture et de blindage du tube de dépôt). Aucun de ces composants ne peut affecter négativement les performances des autres et, en particulier, les performances de ceux qui exercent les fonctions de sûreté à long terme. Chacun doit par exemple être chimiquement et mécaniquement compatible avec les autres, c'est-à-dire notamment ne pas en favoriser la corrosion et ne pas y induire de perturbations mécaniques significatives. Enfin, aucun ne peut, par sa présence, favoriser la migration des radionucléides vers la biosphère.

Enfin, les autres déchets de catégorie C, qui sont moyennement calorifiques, et les déchets de catégorie B seraient empilés, par classe, dans des galeries de 3 à 6 mètres de diamètre et les vides entre les fûts seraient remplis de béton ou d'un matériau similaire. Le nombre de fûts autorisé par section de galerie dépendra entre autres de la nécessité de limiter l'augmentation moyenne de la température dans l'aquifère du Néogène à 6°C ainsi que du pourcentage total de vides dans les déchets. Celui-ci ne devrait pas dépasser 20% afin de limiter le plus possible le risque d'écrasement des emballages et du matériau de remblayage sous la pression de la formation-hôte, et donc sa décompression différée, synonyme de perturbation.

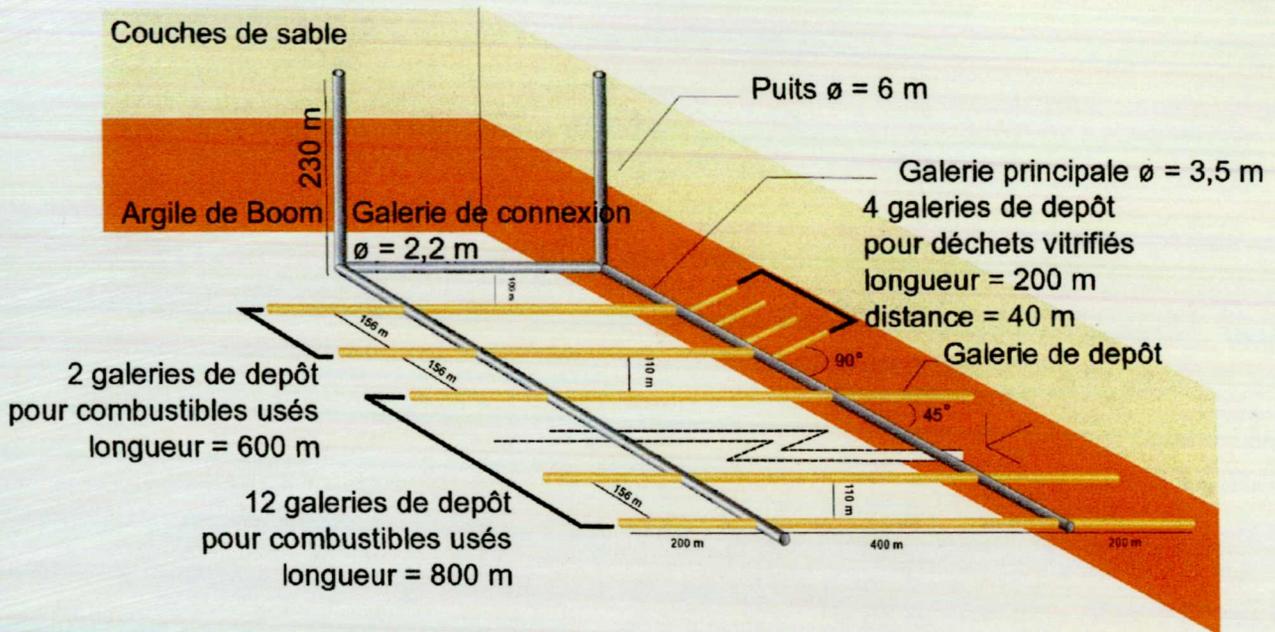


Figure 3.24 L'architecture de référence de dépôt en profondeur pour les combustibles usés.

3.3.2 Les différentes étapes opérationnelles d'un dépôt en profondeur

La phase opérationnelle d'un dépôt final en profondeur peut être découpée en quatre étapes principales : la construction, l'exploitation (c'est-à-dire la mise en dépôt des déchets, éventuellement suivie d'une période d'attente avant la fermeture), la fermeture et le contrôle institutionnel. Cette phase opérationnelle doit être surveillée de près : c'est le *monitoring*, aussi appelé surveillance, du système de dépôt final.

Le monitoring du système de dépôt final consiste à observer et à mesurer, en continu ou de façon discrète, en surface et en profondeur, les paramètres qui permettent d'évaluer le comportement de certains de ses composants et l'impact de l'installation et de son exploitation sur l'environnement. Bien entendu, il ne peut pas perturber le fonctionnement des barrières du dépôt et doit augmenter le moins possible le risque d'intrusions humaines. Le monitoring débute avant la construction du dépôt et se poursuit jusqu'au terme de la phase de contrôle institutionnel. Il vise les quatre objectifs suivants :

- avant la construction du dépôt, déterminer les paramètres et les processus naturels qui caractérisent le site de dépôt et son environnement. Cette caractérisation doit à la fois permettre de mettre ultérieurement en évidence les modifications par rapport à la situation de départ causées par la présence du dépôt et son exploitation et fournir des informations nécessaires au développement de l'architecture de dépôt et aux évaluations de sûreté.
- du début de la phase de construction jusqu'au terme de la phase de contrôle institutionnel, évaluer l'impact de l'installation de dépôt sur le personnel d'exploitation, le public et l'environnement afin de s'assurer du respect des normes en vigueur et, le cas échéant,

Table 3.7 Principales caractéristiques de l'architecture de dépôt final envisagée pour les déchets vitrifiés, fonctions assurées par sûreté radiologique à long terme pour le scénario d'évolution normale (**C1** = étanchéité ; **R1** = résistance à la lixiviation ; **R2** =

Composants	Caractéristiques	Fonctions de sûreté durant les phases				Autres fonctions
		opérationnelle	therm.	d'isolat.	géolog.	
Matrice	verre borosilicaté	immobilisation	–	R1	R1	récupérabilité
Emballage primaire (conteneur cylindrique soudé)	acier inox AISI 309 hauteur : 1.34 m Ø externe : 43 cm épaisseur : 5 mm poids moyen rempli : 492 kg	résistance mécanique	C1	R2	–	manutention, récupérabilité
Suremballage (conteneur cylindrique soudé équipé de 2 x 4 roulettes à 90°)	acier inox AISI 316L hMo hauteur : 1.58 m Ø interne : 46 cm épaisseur : 30 mm poids moyen rempli : 1000 kg	protection radiologique	C1	R2	–	manutention, diminution de la puissance calorifique linéique, récupérabilité
Tube de dépôt	acier inox AISI 316L hMo Ø interne : 55 cm épaisseur : 10 mm long. des tronçons : 3 à 4 m long. des segments : 200 ou 400 m	–	C1	R2	–	mise en place, récupérabilité
Matériau de remblayage des galeries de dépôt	blocs préfabriqués constitués d'un mélange d'argile gonflante FoCa de type bentonitique (60 %), de sable (35 %) et de graphite (5 %)	soutènement	C2	R2	R2	évacuation de la chaleur
Revêtement des galeries de dépôt	blocs de béton préfabriqués épaisseur minimale : 22.5 cm	soutènement	–	–	–	récupérabilité
Galeries de dépôt	Ø int. long. tot. espac. [m]					
principales	2 8 x 800 40	–	–	–	–	dépôt
de connexion	3.5 380 400	–	–	–	–	acheminement
	2 400 –	–	–	–	–	connexion
Puits d'accès	Ø interne : 6 m	–	–	–	–	acheminement
Revêtement des puits d'accès	béton et asphalte	soutènement étanchéité	–	–	–	récupérabilité
Matériau de remblayage du reste de l'installation	mélange d'argile gonflante FoCa et de sable	soutènement	C2	R2	R2	–
Matériau de scellement des galeries et des puits	d'une part, mélange d'argile gonflante FoCa et de sable, d'autre part, béton	protection radiologique résistance mécanique	C2	R2	R2	–

les principaux composants du système et de son environnement et, **en gras**, fonctions considérées dans les évaluations de la diffusion et rétention. La limitation de l'accessibilité L n'est pas reprise.)

Principales études encore nécessaires pour confirmer l'architecture de référence

confirmer que la durabilité de la matrice de verre est nettement supérieure à 10000 ans

confirmer le choix du matériau et déterminer son épaisseur minimale

déterminer la méthode de fabrication, le lieu et la méthode de remplissage, ainsi que la méthode de fermeture par soudure

déterminer s'il faut injecter un matériau de remplissage, comme de la fritte de verre, entre l'emballage primaire et le suremballage afin

d'améliorer l'évacuation de la chaleur et d'augmenter la résistance mécanique tout en diminuant la dégradation de la matrice de verre

déterminer si l'emploi de suremballages permet de déclarer le dépôt « zone non contrôlée pour la contamination radiologique »

confirmer le choix du matériau et les caractéristiques dimensionnelles des tronçons et établir les tolérances

étudier comment mettre en place les tronçons puis les souder dans un alignement parfait et comment fermer le tube à son extrémité

vérifier que, jusqu'au terme de la période de récupérabilité éventuelle, le tube reste étanche et non déformé et qu'il conserve une surface

intérieure suffisamment lisse et propre pour permettre de pousser ou de tirer un suremballage sur 200 mètres

déterminer l'espace à laisser entre deux suremballages pour leur permettre de se dilater librement sous l'effet de la chaleur

étudier le comportement du tube sous l'influence de la charge thermique et d'une pression de gonflement non homogène

déterminer s'il faut injecter un matériau de remplissage (fritte de verre) entre le suremballage et le tube

confirmer le choix du matériau de remblayage et optimiser sa composition de façon notamment à obtenir une conductibilité thermique

suffisante et une pression de gonflement homogène, qui ne perturbe pas l'argile et n'écrase pas le tube

déterminer sous quelle forme (blocs, granules, etc.) acheminer le matériau de remblayage dans les galeries et comment le placer

étudier le risque que le tube rempli s'enfonce dans le matériau de remblayage sous son propre poids

étudier la cinétique d'hydratation naturelle et le recours éventuel à l'hydratation artificielle pour obtenir la pression de gonflement voulue

confirmer le choix du matériau, optimiser sa composition et déterminer les dimensions des blocs

déterminer la distance maximale entre les blocs et le front de taille ainsi que la surexcavation

établir un plan catastrophe d'évacuation

déterminer les caractéristiques à donner aux chambres de connexion entre galeries de dépôt et galeries principales

confirmer la distance minimale entre la galerie de connexion et la première galerie de dépôt

confirmer le diamètre

-

-

confirmer le choix du matériau de remblayage, optimiser sa composition et préciser comment le placer

étudier l'architecture et la composition des bouchons des galeries et des puits

Safeguards Exigences établies par les traités internationaux de non-prolifération des matières fissiles visant à empêcher leur détournement à quelque fin que ce soit. Ces exigences incluent notamment la comptabilité et la traçabilité des matières fissiles mises en dépôt (voir aussi section 2.2.4).

d'apporter les ajustements nécessaires, ainsi que *comparer le comportement des divers composants du système de dépôt avec les comportements supposés dans les évaluations effectuées.*

- après quelques années ou quelques dizaines d'années d'exploitation, *fournir une base de décision* fondée sur l'expérience en permettant d'optimiser les aspects de l'architecture qui offrent encore certains degrés de liberté et en permettant de présenter à toutes les parties concernées des arguments concrets et convaincants chaque fois que doivent être prises des décisions importantes et, en particulier, la décision de fermer le dépôt.
- dans le cas d'un dépôt contenant de grandes quantités de matières fissiles, *s'assurer, conformément aux exigences de l'AIEA en matière de safeguards, de l'absence de détournement de ces matières.*

3.3.2.1 Construction

Les origines de la construction du laboratoire souterrain HADES, situé à l'aplomb du site du CEN-SCK à Mol, remontent aux années septante. Cette construction s'inscrit en effet dans le cadre du premier programme (1975–1979) de recherche et développement du CEN-SCK relatif à la mise en dépôt final des déchets des catégories B et C. Ce programme avait pour objectif principal d'évaluer dans quelle mesure il était possible de construire à une profondeur de l'ordre de 220 mètres dans la couche d'Argile de Boom à Mol un réseau de galeries telles que celles envisagées pour abriter définitivement les colis de déchets afin qu'ils ne risquent pas d'exposer l'homme et l'environnement à des doses de rayonnement supérieures à celles qui sont raisonnablement acceptables. Parallèlement, ces galeries devaient permettre de réaliser une série d'expériences in situ complémentaires à celles faites en surface sur des échantillons prélevés lors des sondages.

Conformément à sa mission de gestion à long terme des déchets radioactifs, l'ONDRAF s'est associé au projet du CEN-SCK à partir de 1985 et a conservé l'Argile de Boom à l'aplomb du site de Mol comme formation de référence pour son programme de mise en dépôt final, et donc notamment pour l'évaluation de nouvelles techniques de construction. Les travaux d'extension de l'installation souterraine effectués depuis lors sont toujours en cours. Ils ont démontré qu'il est possible de creuser en toute sécurité des puits dans les sables aquifères après les avoir congelés et de creuser les installations souterraines nécessaires au dépôt dans l'Argile de Boom sans la congeler. En combinaison avec les résultats des évaluations de sûreté à long terme, ils ont également mis en exergue l'importance de limiter les perturbations causées dans l'argile par les travaux d'excavation, puisque celle-ci constitue la principale barrière à la migration des radionucléides. Ils en sont maintenant au stade de l'optimisation technique et économique, c'est-à-dire qu'ils doivent aboutir à la sélection d'une technique de creusement et d'un revêtement qui soient faciles à mettre en œuvre, sûrs et économiques, en plus du fait que la technique de creusement doit limiter autant que possible les perturbations dans la formation. Cette optimisation se fera au moins en partie lors du creusement des galeries nécessaires à l'expérience de démonstration PRACLAY (voir section 3.3.3).

Evolution des conditions de creusement et des techniques de soutènement

La construction toujours en cours du laboratoire souterrain HADES a connu cinq phases depuis 1980 (figs. 3.25 et 3.26), caractérisées principalement par la simplification des conditions de creusement et l'évolution des types de revêtement grâce à l'amélioration des connaissances relatives au comportement géomécanique de l'argile. L'ensemble de cette installation est équipé d'instruments de mesure placés dans l'argile avant la pose du revêtement ainsi que d'instruments placés sur le revêtement pour en mesurer la déformation. Les différents types de revêtement sont par ailleurs pourvus d'ouvertures de diverses dimensions, ce qui permet d'accéder à l'argile pour y effectuer des expériences. Enfin, l'installation de recherche se situe, non pas au milieu de la couche d'Argile de Boom, mais bien dans sa partie supérieure, à 223 mètres de profondeur, en raisons des caractéristiques géométriques envisagées pour l'architecture de dépôt à l'époque du début de la construction.

Le CEN-SCK fit construire le *premier puits* d'accès à la formation argileuse en prenant un maximum de précautions. Celui-ci fut creusé entre 1980 et 1982, au marteau piqueur et à la pelle, dans un terrain préalablement congelé à une température comprise entre -10 et -15°C grâce à 2×16 tubes congélateurs uniformément répartis en deux cercles concentriques. Cette technique couramment utilisée pour traverser des sables aquifères devait permettre, d'une part, de séparer hydrauliquement le puits de l'aquifère jusqu'à la mise en place du revêtement étanche (une feuille en polyéthylène prise en sandwich entre deux couches de béton projeté de 40 centimètres d'épaisseur chacune) et, d'autre part, d'assurer la stabilité géomécanique de l'excavation dans les sables et dans l'Argile de Boom jusqu'au placement du revêtement. Le diamètre à creuser fut fixé à 4.3 mètres, pour donner un diamètre utile de 2.65 mètres minimum. Le premier puits, profond de 214.7 mètres, débouche sur une chambre de connexion de 13 mètres de hauteur et de 4 mètres de diamètre interne.

La *galerie expérimentale HADES* fut construite en 1982–1983, également après congélation de la formation argileuse. Elle possède sur une bonne partie de sa longueur un diamètre utile de 3.5 mètres et mesure 39 mètres de long depuis la face extérieure de la chambre de connexion jusques et y compris le bouchon de 2 mètres d'épaisseur en béton armé qui obture son extrémité. Pour le calcul de son revêtement, le CEN-SCK opta pour l'approche « tunnel » plutôt que pour l'approche « mine ». Alors que dans l'approche mine, le revêtement ne vise qu'à stabiliser la formation à court et moyen terme, moyennant rectification éventuelle du diamètre des galeries, peu commode en phase d'exploitation, dans l'approche tunnel, le revêtement est conçu pour reprendre les contraintes qui s'exerceront à long terme. Cette approche est en outre plus sûre pour le personnel et limite les perturbations induites dans la formation. Les paramètres utilisés pour le calcul des revêtements furent la pression lithostatique (4.5 MPa), un coefficient de pression des terres au repos K_0 (rapport entre la pression horizontale et la pression verticale) de 0.6 et les coefficients de sécurité classiques. Les contraintes et moments importants résultant de ces hypothèses prudentes justifiaient le recours à un revêtement très résistant : des voussoirs en fonte nodulaire galvanisée, extrêmement rigides (fig. 3.27a).

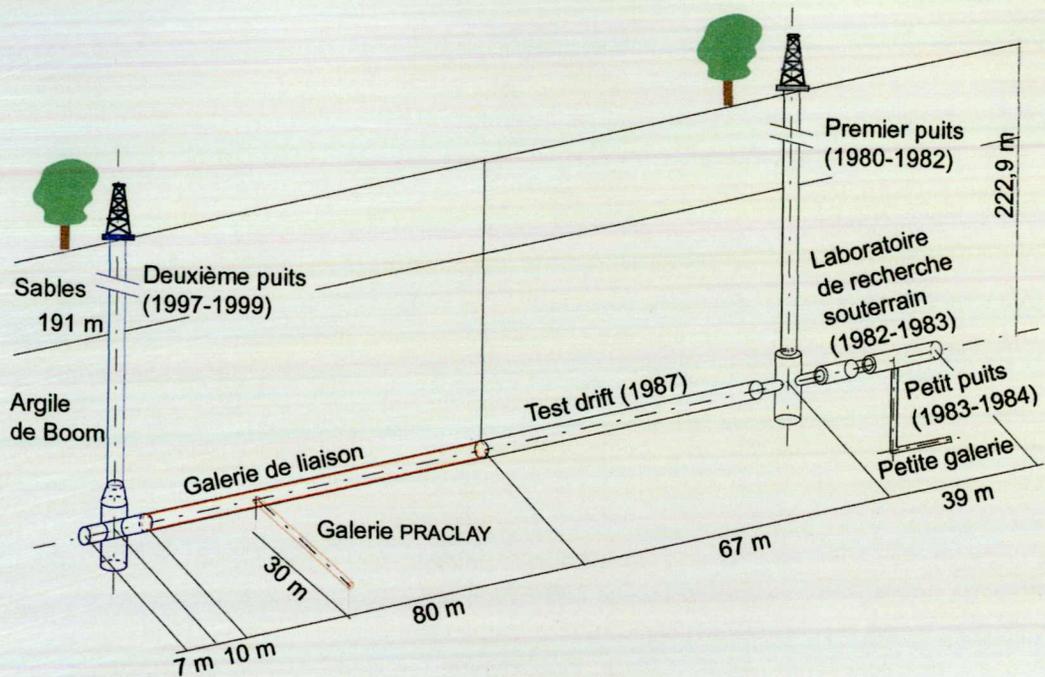


Figure 3.25 Le laboratoire souterrain de recherche HADES.



Figure 3.26 Vue générale du laboratoire souterrain de recherche HADES.

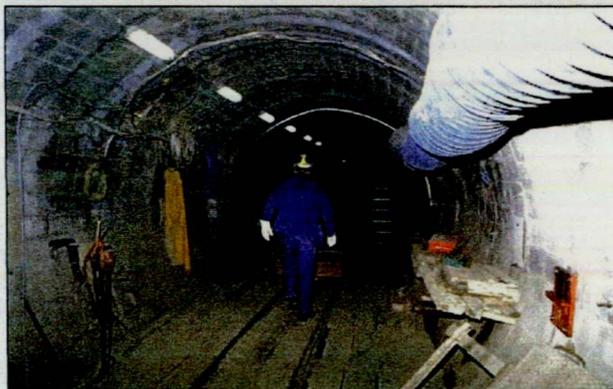
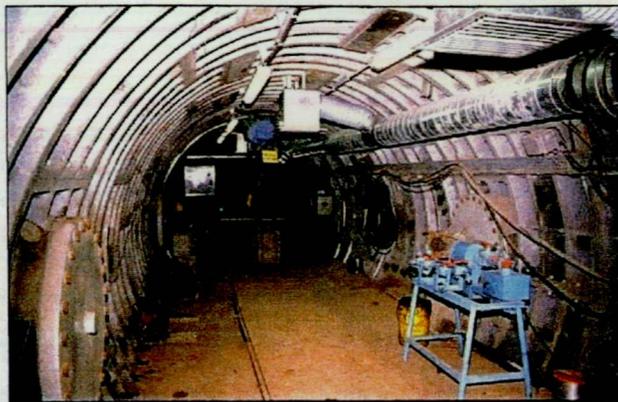


Figure 3.27 Les trois types de revêtement utilisés jusqu'à présent dans l'installation souterraine : (a) voussoirs en fonte nodulaire (galerie expérimentale HADES) ; (b) claveaux en béton (petite galerie et Test Drift) ; (c) cintres métalliques coulissants (Test Drift, partie ANDRA).

La technique de la congélation et l'utilisation de voussoirs en fonte nodulaire semblant économiquement parlant fort peu réalistes pour une installation de dépôt réelle, le CEN-SCK décida alors d'évaluer la possibilité de creuser des galeries dans l'argile sans l'avoir congelée au préalable et d'utiliser un revêtement meilleur marché. C'est ainsi qu'il entreprit en 1983 la construction du *petit puits*, à 2.5 mètres du fond de la galerie HADES. Celui-ci fut creusé à la main, à travers une argile de moins en moins congelée au fur et à mesure de la progression. Il est profond de 23 mètres, possède un diamètre utile de 1.4 mètre et fut revêtu de claveaux en béton de 30 centimètres d'épaisseur séparés par des intercalaires en bois pour en diminuer la

rigidité. La *petite galerie* sur laquelle il débouche, de même diamètre mais longue de 7 mètres seulement, fut excavée en 1984 et revêtue de la même manière (fig. 3.27b). Le front d'argile à son extrémité fut laissé libre afin de mieux pouvoir suivre les mouvements de la formation dans le temps.

La construction du petit puits et de la petite galerie ayant démontré qu'il était possible d'excaver l'Argile de Boom sans la congeler, l'ONDRAF et le CEN·SCK décidèrent alors de vérifier qu'il était possible de construire une galerie de diamètre comparable à celui des galeries à prévoir pour une installation de dépôt réelle sans congeler l'argile et toujours en la revêtant de claveaux en béton. Cette galerie permettrait également d'effectuer des expériences dans l'Argile de Boom non perturbée par la congélation. Les hypothèses de calcul des revêtements considéraient cette fois la pression lithostatique (4.5 MPa), un K_0 de 0.7 au lieu de 0.6 et des coefficients de sécurité moindres que précédemment. Le *Test Drift*, qui mesure 3.5 mètres de diamètre et 67 mètres de long, fut creusé en 1987 au marteau piqueur. Il est revêtu de deux types de matériaux de soutènement : des claveaux en béton de 60 centimètres d'épaisseur et, sur un court tronçon exploité par l'Agence nationale française pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA), des cintres métalliques coulissants (fig. 3.27c), peu rigides et permettant donc une certaine convergence de la formation.

Le *deuxième puits*, enfin, a été creusé entre 1997 et 1999, pour satisfaire à la réglementation minière qui imposait que les installations souterraines existantes soient dotées d'un accès supplémentaire avant d'entreprendre le creusement de la galerie destinée à permettre de nouvelles expériences, et notamment l'expérience PRACLAY. Il a été creusé à 90 mètres de l'extrémité du *Test Drift*, auquel il sera relié par cette galerie dite « de liaison », grâce à un marteau piqueur monté sur un bras hydraulique et à des marteaux pneumatiques à main, en ne congelant que les sables aquifères et les premiers mètres d'argile. Comme le premier puits, il a un diamètre utile constant (3 mètres), est tapissé d'un revêtement multicouche dans les sables aquifères et débouche sur une chambre de connexion plus large. Son revêtement a toutefois été étudié pour présenter une meilleure étanchéité que celui du premier puits, permettre une meilleure répartition des contraintes dans sa partie interne et les découpler de celles qui s'exercent dans sa partie externe. Le revêtement externe en béton projeté, dont l'épaisseur augmente progressivement de 0.2 à 0.4 mètres, a ainsi été séparé par de l'asphalte du revêtement interne, constitué de cylindres creux préfabriqués en béton de 0.3 mètres d'épaisseur cerclés d'une tôle étanche en acier. L'asphalte, qui présente à long terme un comportement liquide, exerce sur le revêtement interne une pression équivalente à sa pression hydrostatique et y induit des contraintes isotropes. Elle découple par ailleurs le comportement du revêtement interne de celui du revêtement externe, sur lequel s'exercent la pression lithostatique et la pression hydrostatique des formations traversées.

Le creusement du bas du deuxième puits, de la chambre de connexion et de l'amorce de la galerie de liaison (fig. 3.28a) s'est fait de façon à tenir compte au mieux des connaissances alors les plus récentes sur le comportement de l'Argile de Boom non congelée, à savoir que celle-ci présente un comportement élasto-visco-plastique et que sa convergence peut être élevée (voir section 3.6). Il fallait donc, aussi bien pour des raisons de sécurité que pour éviter de trop décompresser la formation, mettre en place le plus rapidement possible après le

creusement un soutènement capable de limiter cette convergence. Un revêtement provisoire en cintres métalliques coulissants fut donc placé dans les plus brefs délais (fig. 3.28b), le revêtement définitif, du béton coulé sur place sur des armatures métalliques, n'étant placé qu'une fois l'excavation terminée. Des plans de glissement et des fissures de plusieurs mètres de long et ouvertes par endroits de plusieurs millimètres apparurent toutefois dans la partie supérieure de l'amorce de la galerie de liaison, du fait notamment que la zone était déjà décomprimée par le creusement du puits et en raison de retards dans l'exécution des travaux (fig. 3.29). Le programme de caractérisation initié depuis devrait permettre de répondre aux questions quant à l'origine de ces phénomènes (fractures néoformées, donc strictement induites par le creusement, ou fractures naturelles réactivées par le creusement), à leur étendue, à leur impact sur la conductivité hydraulique de la formation, à leur comportement à long terme (cicatrisation) ainsi qu'à leur impact sur la sûreté tant opérationnelle qu'à long terme.

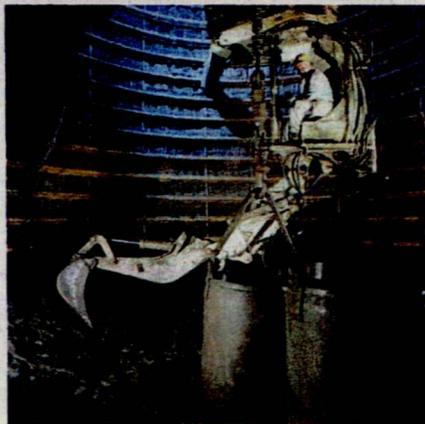


Figure 3.28 Creusement du deuxième puits : (a) creusement de l'amorce de la galerie de liaison ; (b) bras hydraulique et cintres coulissants.



Figure 3.29 Creusement du deuxième puits. Plan de glissement et fissures observés lors du creusement de l'amorce de la galerie de liaison.

La base du deuxième puits sera reliée en 2002 à l'installation existante par une galerie de liaison pendant le creusement de laquelle le comportement hydromécanique de la formation argileuse et l'avancée du front de taille seront suivis grâce aux capteurs installés à partir du front du Test Drift (projet CLIPEX), ces capteurs ayant été installés longtemps à l'avance de manière notamment à permettre une stabilisation de l'instrumentation et du massif. La galerie de liaison, qui sera revêtue d'un système expansible de claveaux en béton selon la technique *wedge block* afin de limiter au maximum la convergence du massif (voir ci-dessous), doit notamment permettre le creusement de la galerie PRACLAY en 2006 (voir section 3.3.3).

Limitation des perturbations autour des excavations

S'il est aujourd'hui acquis qu'il est possible de construire des galeries de grand diamètre dans l'Argile de Boom non congelée, encore faut-il que les techniques utilisées perturbent le moins possible les propriétés de la formation, dans la limite de ce qui est techniquement et économiquement réaliste (voir section 3.6). L'optimisation du choix de techniques d'excavation et de soutènement appropriées pour la construction du dépôt final vise à limiter

les perturbations géomécaniques et hydrauliques autour des excavations en minimisant la convergence lors du creusement. Outre qu'elles dépendent bien entendu du diamètre excavé, ces perturbations sont en effet d'autant plus faibles, à diamètre excavé constant, que

- la vitesse de creusement est élevée ;
- le temps entre l'abattage du terrain et la pose du revêtement est court ;
- la surexcavation est faible ;
- le contact entre le revêtement et le profil excavé est bon ;
- le revêtement est rigide.

(Un troisième type de phénomène affectant la zone perturbée par l'excavation dans les argiles est la modification des propriétés géochimiques du milieu suite à l'oxydation de l'argile, et notamment de la pyrite, qui peut conduire à la libération de sulfates et à l'acidification du milieu.)

D'après les connaissances actuelles, la technique du tunnelier, couramment utilisée en génie civil pour le creusement de longs tunnels, y compris dans des terrains de comportement similaire à celui de l'Argile de Boom mais à des profondeurs moindres, combinée à un revêtement segmentaire expansé en béton selon la technique *wedge block*, semble répondre à l'exigence de minimisation des perturbations. (Bien que couramment utilisée à faible profondeur, la méthode du microtunnelier associée à la technique dite des « tubes poussés » (*pipe jacking*), envisagée comme alternative possible aux techniques de creusement classique pour creuser des galeries de 200 mètres de long mais de 60 cm de diamètre seulement, est actuellement jugée difficilement praticable à la profondeur envisagée pour le dépôt final, tout au moins en cas d'utilisation d'un microtunnelier classique, en raison de la convergence rapide de l'argile et des forces de frottement élevées qui en découlent et accroissent le risque de blocage.)

Les tunneliers mécanisés présentent plusieurs types d'avantage.

- Ils permettent une section d'excavation circulaire, la configuration la plus stable mécaniquement.
- Ils peuvent atteindre une vitesse de creusement d'au moins 10 mètres par jour, autrement dit une vitesse supérieure à celle à partir de laquelle la vitesse de convergence axiale en avant du front de taille est faible, et donc à partir de laquelle la formation est moins perturbée. (Pour des galeries de 2 mètres de diamètre utile, cette vitesse de creusement critique a été estimée à 2 mètres par jour.)
- Ils peuvent être équipés d'un bouclier cylindrique permettant de soutenir le terrain jusqu'à la pose, le plus rapidement possible, du revêtement définitif à l'arrière de la machine.
- Ils sont sûrs, modulables et démontables, et leur emploi est d'autant plus intéressant, en termes de coût, que la galerie à creuser est longue.

La difficulté de la technique du tunnelier consiste à trouver le meilleur compromis au niveau de la surexcavation : celle-ci doit être la plus faible possible par rapport au diamètre nominal du revêtement afin de minimiser les perturbations dans la formation, tout en étant malgré tout suffisante pour éviter que le tunnelier ne se bloque suite à la convergence de l'argile et à la pression lithostatique élevée à cette profondeur. La valeur de la convergence totale — c'est-à-

dire le mouvement total du massif en périphérie d'une galerie par rapport au massif avant excavation, en ce compris la convergence à l'avant du front de taille — est actuellement estimée à une valeur comprise entre 4 et 9 cm sur un rayon d'excavation de l'ordre de 2.5 mètres.

L'emploi d'un revêtement segmentaire expansé en béton selon la technique *wedge block* offre lui aussi différents avantages.

- Il est intrinsèquement stable du fait que, comme des clés de voûte, la ou les clés trapézoïdales (qui donnent son nom à la technique) insérées de force par effet de coin entre les claveaux en béton formant chaque anneau du revêtement mettent celui-ci en post-contrainte directement en contact avec l'argile. (Les anneaux de revêtement sont assemblés immédiatement derrière le tunnelier, les claveaux en béton étant tenus au moyen d'un érecteur jusqu'à la pose de la ou des clés.)
- Le béton est un matériau qui se comporte très bien en compression, le principal mode de sollicitation induit dans un revêtement circulaire soumis à des contraintes externes quasiment isotropes ($K_o \approx 0.9$; voir section 3.6).
- Le béton est un matériau économique.

Un tel revêtement n'est toutefois pas étanche, ce qui n'est pas un inconvénient en phase opérationnelle, dans la mesure où la faible conductivité hydraulique de l'Argile de Boom rendra insignifiant le débit d'eau qui percolera vers les galeries et que celle-ci sera entièrement évaporée et évacuée par la ventilation.

La technique *wedge block* n'est toutefois pas utilisable en cas d'intersection d'une galerie avec d'autres structures souterraines. C'est pourquoi les galeries principales, qui desserviront les galeries de dépôt, seront revêtues d'un revêtement additionnel ou d'un autre revêtement, conçu pour reprendre le supplément de contraintes qui apparaîtra lors de la construction des croisements entre galeries, minimiser les perturbations résultantes dans l'argile et, par conséquent, maximiser la longueur utilisable dans les galeries de dépôt. Par ailleurs, la construction des chambres de connexion entre les puits et les galeries, qui est difficile à mécaniser, induira inévitablement des décompressions plus marquées dans la formation proche, dont on tiendra compte dans le dépôt final en imposant une distance minimale entre les puits et la première galerie de dépôt.

Le creusement en 2002 de la galerie destinée à relier le deuxième puits au Test Drift, qui sera longue de 84 mètres et aura un diamètre utile de 4 mètres, devrait permettre de démontrer que la technique du tunnelier est utilisable à la profondeur du dépôt et qu'associée à la technique *wedge block*, elle satisfait aux contraintes de sécurité à court terme tout en minimisant les perturbations. Il permettra en outre d'étudier la valeur à donner à la surexcavation. La vitesse de creusement, qui devra être d'au moins 2 mètres par jour, sera vraisemblablement limitée par la capacité du deuxième puits en termes d'évacuation des déblais et de transport des claveaux. Les hypothèses de calcul du revêtement pour les sections sans ouvertures et non soumises à des contraintes thermiques sont $P_v = 3.5$ MPa et $P_h = K_o P_v$, avec $K_o = 0.9$.

3.3.2.2 Exploitation

Bien que l'exploitation du dépôt final en profondeur ait fait l'objet de relativement peu d'études jusqu'à présent, l'expérience tirée de l'exploitation quotidienne du laboratoire souterrain HADES et de la conduite des nombreuses expériences qui y sont menées, dont certaines ont utilisé ou utilisent des sources radioactives, constitue une somme de connaissances non négligeable en matière d'exploitation.

Concrètement, l'exploitation du dépôt final en profondeur comprendra des *opérations souterraines conventionnelles* comme la ventilation, l'exploitation des systèmes de levage équipant les puits d'accès, les transports, l'éclairage, ou encore le contrôle et l'entretien des équipements, ainsi que les *opérations de mise en dépôt* des déchets radioactifs proprement dites. L'étude de ces dernières, qui progresse en parallèle avec le développement de l'architecture de dépôt final et l'acquisition des nouvelles connaissances, s'est jusqu'à présent limitée aux déchets vitrifiés et aux combustibles usés, et n'a du reste pas dépassé le stade de l'étude de faisabilité pour ces derniers. Les opérations de mise en dépôt de ces deux classes de déchets devraient être assez similaires, les principales différences résultant de la différence de longueur des emballages, qui peuvent aller jusqu'à 5 mètres dans le cas des combustibles usés. Elles se feront de façon entièrement mécanisée, par des robots commandés à distance, et s'accompagneront de mesures destinées à garantir la protection radiologique du personnel d'exploitation.

Dans l'architecture de référence actuelle, les *déchets vitrifiés* sont réceptionnés dans une installation de surface du site de dépôt, où les suremballages sont extraits des emballages de transport et placés dans un chariot de transfert, qui les acheminera jusqu'à leur destination finale. Ce chariot porte un barillet de chargement blindé à quatre alvéoles pouvant chacune contenir un suremballage, barillet qui est perpendiculaire aux rails sur lesquels roule le chariot. Il avance alors jusqu'à un des puits d'accès pour être descendu jusqu'au niveau des galeries souterraines, où il roule jusqu'à l'entrée de la galerie de dépôt prévue. Là, son châssis mobile se soulève jusqu'au niveau du tube de dépôt puis avance pour permettre à la vanne de blindage du barillet de s'emboîter dans celle de la galerie de dépôt, de façon à assurer la continuité du blindage radiologique. Les vannes sont solidarisées par des vérins puis sont ouvertes, et le barillet tourne jusqu'à amener une première alvéole en face de l'ouverture du tube. Une machine installée dans un logement sur le chariot, dite « robot-pousseur », pousse alors le premier suremballage jusqu'à sa position définitive dans le tube de dépôt. Après avoir mis le suremballage en place, le robot-pousseur revient à vide jusque dans son logement. La séquence est répétée trois fois, après quoi les deux vannes de blindage sont refermées, les vérins sont rétractés et le châssis est descendu. Le chariot de transfert retourne ensuite vers le puits pour être remonté en surface et être chargé avec quatre autres suremballages.

Le chariot de transfert et le robot-pousseur sont déjà à un stade de développement avancé : un prototype de chaque machine pratiquement à échelle réelle est en démonstration dans le hall d'exposition HADES-PRACLAY à Mol (fig. 3.30). En réalité, selon l'implantation du dépôt dans la couche d'argile, soit le chariot de transfert soit le robot-pousseur devra être capable

d'affronter une pente de 2%. Le robot-pousseur devra en outre être capable de pousser des colis de 1000 kg environ sur une distance de 200 mètres et avoir une précision de positionnement de l'ordre du centimètre, de manière à pouvoir laisser un faible espace entre deux suremballages successifs, afin de permettre leur dilatation thermique. La pince dont il est équipé lui permettra d'agripper la tête du suremballage pour le récupérer le cas échéant. Les essais concluants réalisés sur une bonne dizaine de mètres avec des suremballages lestés doivent encore être confirmés par des essais sur 200 mètres et l'effet de la température et des rayonnements sur les composants électroniques et mécaniques doit être étudié plus avant.

La mise en dépôt des emballages de *combustible usé* serait une variante de la mise en dépôt des suremballages de déchets vitrifiés. Parce qu'ils ne pourront être descendus horizontalement dans l'installation de dépôt en raison de leur longueur, les emballages seraient placés dans un conteneur de transfert blindé qui serait descendu en position verticale par le puits d'accès puis basculé horizontalement au fond du puits et déposé sur un chariot chargé de le conduire jusqu'à la galerie de dépôt voulue. Comme le chariot de transfert destiné aux déchets vitrifiés, ce chariot permettrait de positionner le conteneur blindé en face du tube de dépôt prévu et serait équipé d'un robot-pousseur. L'emploi de conteneurs de transfert à quatre places comme le barillet des chariots de transfert imposerait toutefois, étant donné leur encombrement, d'élargir les galeries principales au niveau des galeries de dépôt à un diamètre de 6 mètres, ce qui serait compliqué et coûteux. Une solution alternative serait d'utiliser des conteneurs de transfert monoplaces.

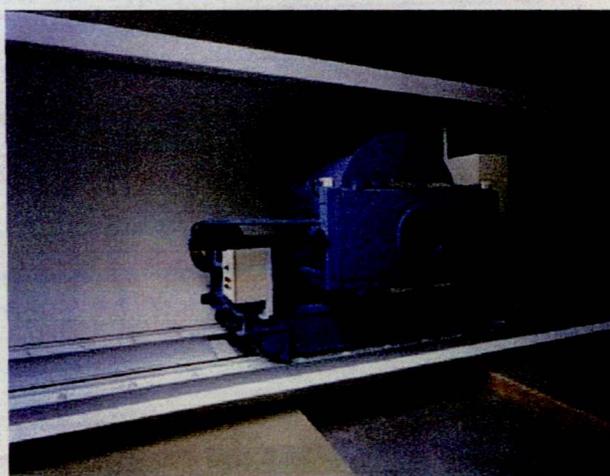


Figure 3.30 Le dispositif de manutention des suremballages de déchets vitrifiés en démonstration dans le hall HADES-PRACLAY.

3.3.2.3 Fermeture

D'après le calendrier de référence, la fermeture du dépôt final, qui impliquera le déclassement des installations de surface ainsi que l'isolation définitive des voies d'accès aux déchets, interviendra au plus tard quelques années après la fin des activités de mise en dépôt. Elle ne sera décidée que pour autant, d'une part, que le monitoring des installations durant l'exploitation ait confirmé le bon fonctionnement du système et, d'autre part, que les autorités compétentes et toutes les autres parties concernées aient acquis l'intime conviction que le système est robuste et offre un niveau suffisant de sûreté passive. Conceptuellement, les galeries principales et les puits pourraient toutefois être gardés ouverts plus longtemps, ce qui introduirait un important degré de flexibilité dans le processus décisionnel, mais il faudrait alors justifier soigneusement cette décision, notamment sur base d'une analyse étendue de ses effets négatifs potentiels sur la sûreté. La durée de cette phase ouverte ne pourrait sans doute pas excéder une centaine d'années environ, faute de quoi son impact sur la sûreté opérationnelle et sur la sûreté à long terme serait considérable. Il faudrait en effet dans ce cas effectuer d'importants travaux d'entretien et de rénovation, et différents types de perturbations pourraient réduire la capacité de confinement du système de dépôt et sa robustesse. De plus, les évolutions conjoncturelles pourraient perturber le processus décisionnel, ce qui pourrait conduire à négliger l'installation de dépôt ouverte et même, à terme, à la laisser sans surveillance.

Outre qu'elle marque la transition d'un système de surveillance active des déchets vers un système de confinement passif, la fermeture du dépôt final est indispensable pour assurer sa sûreté à long terme. Elle doit en effet

- assurer la stabilité géomécanique de la formation-hôte afin d'éviter l'effondrement progressif des galeries de dépôt, qui risquerait d'entraîner l'écrasement des colis de déchets et d'étendre la région perturbée de la formation (remblayage) ;
- prévenir toute migration préférentielle des radionucléides via les galeries et les puits (scellement) ;
- diminuer la probabilité et les conséquences d'une éventuelle intrusion humaine sur le site, en surface ou en profondeur (scellement et remblayage).

Sa bonne exécution contribue donc dans une large mesure à la performance future du dépôt final, de sorte que les conditions de sa mise en œuvre, notamment au niveau du choix des matériaux et des techniques de mise en place, doivent être soigneusement étudiées (voir section 3.4.2.2).

Concrètement, la fermeture du dépôt final consistera essentiellement à *remblayer*, avec un matériau à base de sable mélangé à une argile gonflante, puis à *sceller* de manière étanche les galeries principales, la galerie de connexion et les puits d'accès, de manière à éviter la formation de voies de migration préférentielles pour les radionucléides. (Les galeries de dépôt auront été remblayées progressivement avant ou durant la phase de mise en place des déchets, puis scellées une fois remplies.) Bien que le revêtement des galeries et des puits possède une conductivité hydraulique plus élevée que l'Argile de Boom et puisse donc

constituer un chemin de migration préférentiel pour les radionucléides, il sera conservé partout, excepté à la hauteur du scellement des galeries principales, où il sera éliminé, avec l'épaisseur d'argile qui aura été perturbée par l'excavation. La cavité ainsi formée sera alors remplie d'une argile gonflante du même type que le matériau de remblayage utilisé pour les galeries de dépôt, laquelle exercera donc une certaine pression sur la formation argileuse et qui sera elle-même prise en sandwich entre deux bouchons d'ancrage en béton. Chaque galerie principale sera scellée par au moins deux bouchons étanches de ce type placés en série. Ils devront notamment posséder une conductivité hydraulique au moins aussi faible que celle de la formation-hôte, résister à la pression lithostatique et perturber le moins possible les caractéristiques géomécaniques et géochimiques initiales de la formation-hôte.

La phase de fermeture du dépôt final se clôturera par deux étapes ultimes : le marquage du site et l'archivage, pour une période indéfinie, de l'ensemble des données caractérisant le système de dépôt et les déchets mis en dépôt. Le *marquage clair du site* par plusieurs types de marqueurs, en surface et en profondeur, devra essentiellement limiter la probabilité d'intrusions humaines. L'*archivage des données*, lui, facilitera pendant un certain temps la récupération éventuelle des déchets, permettra d'éviter, par voie administrative, toute intrusion humaine à moyen et à long terme et, le cas échéant, permettra à moyen terme de prendre des décisions pertinentes à la suite d'une éventuelle intrusion humaine. Ces données pourraient être placées sur plusieurs supports différents et déposées en plusieurs exemplaires auprès d'une ou de plusieurs institutions, y compris éventuellement auprès d'une institution étrangère ou d'un organisme international. Elles seront idéalement sauveées périodiquement avant la péremption de chaque support utilisé. Enfin, la position du dépôt devrait être signalée sur tous les documents topographiques nationaux ou régionaux incluant le site du dépôt.

3.3.2.4 Contrôle institutionnel

Bien que la période de contrôle institutionnel après la fermeture du dépôt final en profondeur ne puisse en aucun cas en garantir la sûreté, un programme de monitoring, qui, selon le choix des générations futures, irait de quelques dizaines à quelques centaines d'années, pourrait utilement contribuer à maintenir la confiance du public et des autres parties concernées dans la sûreté effective du système de dépôt. En plus des activités d'inspection et de monitoring, qui ne pourront bien entendu pas mettre en péril la sûreté passive à long terme du dépôt, ce contrôle comprendrait des mesures destinées à éviter l'utilisation incontrôlée du site et ferait en sorte que les connaissances qui s'y rapportent soient conservées. Ce monitoring actif disparaîtrait ensuite progressivement au profit d'une période de simples contrôles administratifs, après quoi le site serait finalement banalisé. Les connaissances relatives à l'installation de dépôt disparaîtraient alors peu à peu. Il faudrait toutefois veiller à conserver la mémoire de l'emplacement du dépôt.

3.3.3 Le projet de démonstration PRACLAY

Entamé en 1995, le projet de démonstration PRACLAY (*Preliminary Demonstration Test for Clay Disposal*) a pour objectif essentiel de démontrer par l'expérience directe, d'ici 2015 environ, qu'il est techniquement et économiquement possible de mettre des déchets vitrifiés en dépôt dans l'Argile de Boom tout en respectant les contraintes qui découlent des études de sûreté. Ce projet clé ouvert à la collaboration internationale consiste à construire in situ en vraie grandeur un tronçon de galerie de dépôt en tous points comparable aux galeries prévues dans l'architecture de référence, en utilisant autant que possible les techniques industrielles de creusement et les matériaux actuellement prévus dans cette architecture puis à le remplir, en simulant les déchets par des éléments électriques chauffants mais sans utiliser de sources radioactives (fig. 3.25). Il vise aussi à permettre une meilleure compréhension du système de dépôt et des interactions entre ses différents composants, en vue de conforter les résultats qui auront été obtenus au terme de la phase de recherche et développement méthodologique (« étayement de la confiance » dans les modèles, leurs hypothèses de base et leurs prédictions) et d'optimiser ensuite l'architecture de référence et ses éléments constitutifs. Enfin, il permettra d'étudier et de réaliser le croisement entre une galerie principale et une galerie de dépôt. Ce projet est géré par le groupement d'intérêt économique EURIDICE (*European Underground Research Infrastructure for Disposal of Nuclear Waste in a Clay Environment*), qui remplace depuis fin 2000 le GIE PRACLAY, créé en 1995 par le CEN-SCK et l'ONDRAF. Le GIE EURIDICE a élargi ses activités à toute l'exploitation et à la valorisation de l'installation souterraine de recherche HADES.

Afin de préparer l'expérience in situ, une maquette instrumentée de la galerie souterraine a été réalisée en surface en grandeur réelle (fig. 3.31). La maquette OPHÉLIE (*On Surface Preliminary Heating Simulation Experimenting Later Instruments and Equipment*) a un triple objectif :

- démontrer qu'il est possible de placer le matériau de remblayage et étudier son comportement dans des conditions de température, de pression et d'hydratation représentatives des conditions réelles ;
- vérifier que la mise en place du système d'instrumentation sur le tube de dépôt, dans le matériau de remblayage et sur le revêtement ne risque pas de créer de perturbations significatives dans l'argile ;
- vérifier la résistance et la fiabilité des instruments et matériels de mesure dans des circonstances expérimentales sévères, représentatives des conditions in situ, avant leur utilisation souterraine.

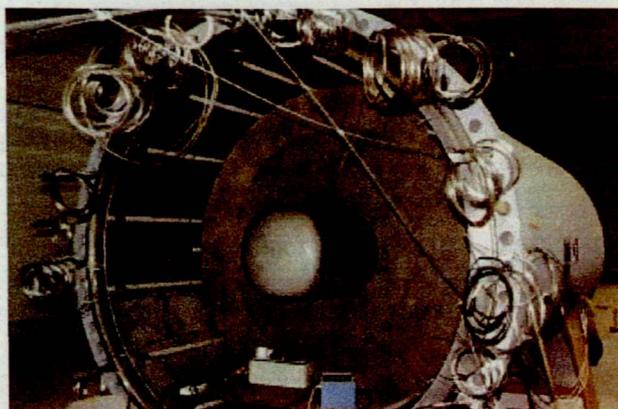


Figure 3.31 La maquette
OPHELIE.

Les résultats et les conclusions définitives relatives aux essais effectués seront disponibles après le démantèlement de la maquette, soit en 2002. Il est toutefois déjà clair que nombre de systèmes d'instrumentation ne sont pas aptes à résister aux conditions sévères d'un dépôt pendant les durées nécessaires, ce qu'ont du reste également révélé les expériences réalisées in situ dans le laboratoire souterrain HADES. Par ailleurs, la présence de chlorures dans la maquette devra être analysée tant en ce qui concerne l'origine de ces derniers que pour ce qui est de leurs conséquences potentielles sur la durabilité des matériaux métalliques et sur le comportement des radionucléides. Enfin, la réalisation de la maquette OPHÉLIE ainsi que la préparation de l'expérience PRACLAY ont d'ores et déjà permis de mettre en évidence ou de préciser une série de questions ouvertes liées à la mise en œuvre pratique de l'architecture de référence (table 3.7).

L'expérience PRACLAY proprement dite, qui se déroulera de 2008 à 2013 environ, étudiera le comportement thermo-hydro-mécanique de l'Argile de Boom dans le champ proche, du revêtement, du matériau de remblayage et du tube de dépôt quand ils sont exposés à une augmentation de température de l'ordre de 80°C, de manière à rester sous les 100°C dans le matériau de remblayage (voir section 3.6). Elle étudiera également la géochimie des eaux interstitielles et les interactions entre les différents composants du système au cours des phases d'hydratation et de chauffage. Les données concernant leur comportement devront donc être collectées dans des conditions aussi proches que possible de celles d'un dépôt réel. La plupart des mesures dans la formation argileuse devant être effectuées dès le début des travaux d'excavation et se poursuivre tout au long de l'expérience, l'instrumentation autour de la future galerie PRACLAY sera donc installée en début de projet, vers 2005. Elle sera doublée pour assurer l'obtention de données jusqu'à la fin de l'expérience.

Bien qu'elle soit une expérience de démonstration, l'expérience PRACLAY présente certaines limitations intrinsèques :

- sa durée (une dizaine d'années) est, par la force des choses, insuffisante pour établir à elle seule, sauf évidence de choix vraiment malencontreux, des constats décisifs en matière de choix et de tenue des matériaux et systèmes de mesure à long terme ;

- elle ne permet pas de prouver la sûreté à long terme, dont la démonstration ne peut être qu'indirecte ;
- elle se fait en l'absence de champ radiatif.

Selon le calendrier actuel, la galerie PRACLAY, longue de 30 mètres, sera creusée en 2006 à partir de la galerie de liaison et les différents éléments de l'architecture (tube de dépôt, système d'hydratation du matériau de remblayage, matériau de remblayage, scellement, etc.) ainsi que l'instrumentation seront mis en place en 2007. Le dispositif expérimental sera alors chauffé durant cinq ans, se refroidira pendant l'année qui suivra puis sera démantelé, après quoi les données recueillies tout au long de l'expérience seront analysées.

3.3.4 Les perspectives

Bien que l'architecture de dépôt final de référence se trouve à un stade de développement conceptuel relativement avancé pour les déchets vitrifiés et les combustibles usés, les nombreuses questions très concrètes soulevées par la préparation de la maquette OPHÉLIE et de l'expérience PRACLAY ainsi que durant la rédaction du rapport SAFIR 2 justifient qu'elle soit réévaluée de manière approfondie en même temps qu'elle sera étendue aux autres classes de déchets du groupe géologique. Ce développement, qui reste itératif, doit s'effectuer de façon systématique et systémique, et s'appuyer sur l'outil d'analyse essentiel que sont les fonctions de sûreté. Plus précisément, le programme futur s'attachera avant tout

- à définir des critères techniques univoques quant à l'architecture générale du dépôt, à ses composants et à son environnement, notamment en termes de températures admissibles et de récupérabilité ;
- à réviser toutes les bases de conception de l'installation de dépôt, en fonction des exigences de sûreté radiologique à long terme et des impositions de sûreté opérationnelle ;
- à développer une architecture de dépôt globale regroupant les solutions développées pour chaque classe ou groupe homogène de classes de déchets et donc, en particulier, à affiner l'architecture de dépôt destinée aux combustibles usés et à développer une architecture de dépôt pour une classe de déchets de catégorie B jugée particulièrement contraignante ;
- à optimiser l'ensemble de l'architecture de dépôt, c'est-à-dire à optimiser la géométrie de ses différentes parties et le choix de tous les matériaux utilisés (table 3.7), en considérant toutes les interactions entre ces derniers ;
- à poursuivre les efforts relatifs aux aspects pratiques du creusement des installations souterraines ;
- à préciser les aspects d'exploitation, tant en termes d'opérations souterraines conventionnelles telles que la ventilation et les mesures anti-incendies qu'en termes d'opérations de mise en dépôt ;
- à préciser les aspects de fermeture ;

- à s'assurer de la représentativité de l'expérience de démonstration PRACLAY en confirmant les principales caractéristiques de l'architecture de dépôt destinée aux déchets vitrifiés ;
- à poursuivre l'expérience de démonstration PRACLAY ;
- à préciser le rôle du monitoring du dépôt et ses liens avec la récupérabilité et la sûreté, et à définir, notamment sur base d'éventuelles prescriptions légales futures, par exemple en matière de *safeguards*, ce qu'il est pertinent de surveiller, c'est-à-dire ce qui est à la fois représentatif de l'état du système de dépôt et de son évolution, susceptible d'entraîner une action corrective et mesurable en pratique ;
- à évaluer les aspects économiques de la mise en œuvre et de l'exploitation de l'installation de dépôt.

3.4 Le comportement des déchets et des matériaux en conditions de dépôt

L'étude du comportement des déchets conditionnés et des matériaux envisagés pour la construction de l'installation de dépôt final en profondeur comprend deux aspects : l'étude de la façon dont ils évoluent chacun en conditions de dépôt, c'est-à-dire l'étude de leurs performances individuelles, et notamment de leur durabilité, et l'étude de leur compatibilité, c'est-à-dire l'étude de leur influence sur les performances des autres constituants du système de dépôt. Ainsi, les matrices de conditionnement des déchets ne peuvent exercer d'influence négative trop marquée sur les propriétés du champ proche (voir section 3.6). De même, le matériau de remblayage ne peut avoir d'effet défavorable sur la corrosion des suremballages.

3.4.1 Le comportement des déchets conditionnés

Outre l'obtention des données de base indispensables aux évaluations de la sûreté radiologique à long terme (voir chapitre 4), les études relatives au comportement des déchets conditionnés du groupe géologique avec l'Argile de Boom visent à valider certaines des hypothèses simplificatrices admises dans ces évaluations. Réalisées par le CEN-SCK, elles ont jusqu'ici essentiellement porté sur les déchets vitrifiés et les déchets bitumés (voir table 3.2 pour l'inventaire des déchets du groupe géologique).

3.4.1.1 Déchets vitrifiés

Une spécificité des études relatives au comportement des verres menées dans le cadre du programme belge consacré à la mise en dépôt final est la réalisation, en plus de la panoplie de tests conduits en laboratoire de surface, de tests in situ, dans le laboratoire souterrain, avec des échantillons de verres inactifs et faiblement dopés (^{134}Cs , ^{90}Sr , ^{239}Pu), dont il a été démontré qu'ils ont un comportement représentatif de celui des verres actifs. Ainsi par exemple, dès la fin des années quatre-vingt, le CEN-SCK a lancé des expériences de longue durée dans le laboratoire souterrain HADES. Ces études in situ plaçaient les matériaux étudiés (des verres, des matériaux d'enrobage des déchets, du béton et des matériaux métalliques d'emballages et de suremballages) dans trois types de situations alors jugées représentatives des conditions de dépôt, à 16, 90 et 170°C, et pour des durées allant de 2 à plus de 7 ans, les trois types de dispositifs expérimentaux correspondants placés dans l'argile à partir de la galerie HADES étant des tubes porte-échantillons en acier inoxydable suffisamment longs (plus de 5 mètres) pour atteindre la zone non perturbée par l'excavation. Plus spécifique encore est l'exemple de l'expérience in situ CERBERUS, dans laquelle un champ d'irradiation gamma représentatif des verres réels était également appliqué (voir section 3.6). Ces différentes études s'inscrivent dans un contexte international, notamment via la participation à différents programmes européens. Elles bénéficient en outre des nombreuses études en milieu argileux menées notamment en France.

Compatibilité

Fait, pour un déchet conditionné mis en dépôt ou pour un matériau utilisé pour la construction même de l'installation, de ne pas avoir d'influence négative sur le comportement attendu des autres constituants du système de dépôt et, en particulier, sur celui de l'Argile de Boom.

Les études menées durant ces dix dernières années ont permis d'identifier les processus de base susceptibles d'opérer lors de la dissolution des verres. Ce sont les processus d'interdiffusion, de dissolution de la silice, de condensation des silicates dans le gel formé à la surface du verre, de précipitation/diffusion/sorption des silicates dans le milieu environnant, et de formation de phases secondaires. Schématiquement, cette dissolution s'effectue en trois étapes (fig. 3.32) :

- interdiffusion, qui se traduit par la formation d'une zone hydratée et appauvrie en éléments alcalins (échange ionique avec les alcalins du verre) ;
- hydrolyse des liaisons entre les éléments formateurs du réseau vitreux ;
- condensation et/ou précipitation des espèces hydrolysées se traduisant par la formation d'une couche altérée amorphe.

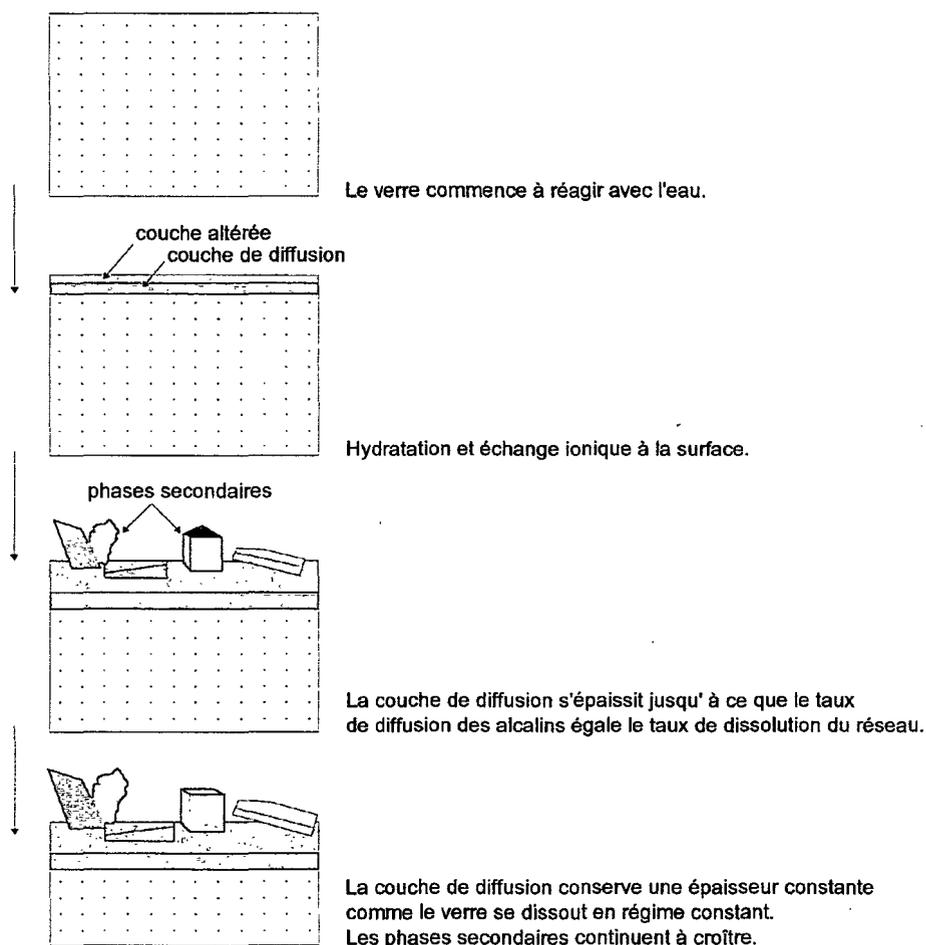


Figure 3.32 Principales étapes de la dissolution des déchets vitrifiés.

Pour la plupart des verres étudiés, les résultats expérimentaux montrent que la vitesse de dissolution diminue de plusieurs ordres de grandeur au cours du temps, pour atteindre des valeurs très faibles dans des conditions dites de saturation, lesquelles sont fonction du système considéré (équilibre dynamique). L'interprétation de cette diminution drastique de la vitesse de dissolution (loi de dissolution fondée sur la notion d'affinité chimique ou bien formation d'un gel protecteur) et l'interprétation de la persistance d'une très faible vitesse de dissolution dans des conditions de saturation sont encore ouvertes.

Les différents tests effectués ou toujours en cours en laboratoire de surface ou in situ couvrent une gamme de conditions très large et ont notamment permis de préciser l'effet des paramètres suivants sur la dissolution des verres :

- *effet de la température* La vitesse de dissolution des verres augmente significativement avec la température (augmentation de deux à trois ordres de grandeur entre 16°C et 90°C). Les verres devront donc impérativement être isolés de l'eau interstitielle pendant la phase thermique du dépôt, qui est pour eux d'environ 300 ans. Cette fonction de confinement physique sera assurée par le suremballage.
- *effet des barrières ouvragées* La vitesse de dissolution des verres n'est pas influencée significativement par la présence des barrières ouvragées. Les nombreux tests réalisés ayant très clairement démontré que le matériau de remblayage (argile FoCa) a un impact comparable à celui de l'Argile de Boom sur la dissolution des verres, c'est cette dernière qui a été retenue comme milieu de référence pour évaluer la durabilité des déchets vitrifiés en conditions de dépôt, d'autant plus que c'est elle qui imposera les conditions physicochimiques dans le champ proche à plus ou moins long terme.
- *effet des rayonnements* La dissolution des verres n'est pas influencée significativement par l'auto-irradiation de la matrice et par l'irradiation du milieu environnant.
- *effet de la dévitrification et de la fracturation* La dévitrification se caractérise par une cinétique extrêmement lente, de sorte que son ampleur restera très limitée sur la durée de vie attendue pour ce type de matrice. Des tests de dissolution réalisés sur des verres partiellement dévitrifiés montrent que la dévitrification ne modifie pas leur comportement. Des résultats de modélisation rapportés dans la littérature relatifs à la fracturation des verres montrent par ailleurs que celle-ci ne semble pas non plus déterminante pour leur durabilité globale. Des études françaises indiquent par ailleurs très clairement que la durabilité des verres pourrait être significativement accrue en conditions de dépôt par l'ajout de dérivés siliceux au matériau de remblayage et/ou dans l'espace annulaire entre le conteneur de déchets vitrifiés et son suremballage (présaturation du milieu préalablement à la dissolution du déchet vitrifié).

La rétention des radionucléides dans la couche altérée à la surface des verres est fonction de la nature de l'élément considéré, du pH et de la présence ou non de phases solides telles que l'Argile de Boom ou l'argile FoCa (compétition entre le verre et les minéraux argileux). Comme dans les conditions d'un dépôt réel, ce processus ne semble pas contribuer significativement à la rétention des radionucléides, les évaluations de sûreté admettent que la lixiviation des radionucléides est déterminée par le taux de dissolution du verre (facteur de rétention égal à 1). La faible solubilité et/ou la sorption des radionucléides par les phases solides ont

toutefois pour conséquence que les fractions mobiles sont, pour la majorité des radionucléides étudiés, faibles au regard des quantités lixiviées. Elles semblent dépendre, tout au moins dans une première étape, de la composition du verre, du degré d'avancement de la réaction et de la concentration initiale des radionucléides dans le verre. Sur de longues durées, les concentrations en solution se stabilisent toutefois le plus souvent.

Les études de modélisation de la dissolution des verres portent sur deux domaines distincts :

- *la modélisation géochimique* vise à identifier les phases secondaires susceptibles de se former et de contrôler la concentration d'éléments clés, tels que la silice et des radionucléides critiques ou potentiellement critiques, libérés dans le milieu lors de la dissolution des verres ;
- *la modélisation de la dissolution des verres (modèle cinétique)* proprement dite vise à développer un modèle analytique couplant la loi de dissolution des verres ainsi que les phénomènes de diffusion et de sorption des silicates dans le milieu environnant. Elle a fait des progrès substantiels et bénéficie de l'apport d'une technique originale très prometteuse récemment développée par le CEN-SCK afin d'étudier les mécanismes de dissolution (dont la formation de la couche altérée) à l'échelle microscopique, et donc de vérifier certaines des hypothèses retenues dans le cadre de l'élaboration d'un modèle analytique.

Les résultats de la modélisation géochimique du système verre-eau-argile indiquent que l'Argile de Boom pourrait agir comme une pompe à silice : le milieu pourrait être théoriquement maintenu dans des conditions d'insaturation par rapport au verre. Dans les limites des données thermodynamiques sélectionnées, le modèle ne prédit aucune formation de phases secondaires. La dynamique des processus de dissolution des verres pourrait toutefois imposer l'établissement de conditions stationnaires différentes de celles correspondant à un équilibre thermodynamique.

En ce qui concerne la modélisation cinétique, la loi de dissolution telle qu'elle a été initialement proposée par Grambow continue à être utilisée provisoirement en raison de son caractère conservatif et de l'absence de propositions alternatives traitables dans les modèles analytiques existants, mais elle devra parallèlement être revue et/ou adaptée.

Suite à l'accroissement considérable des capacités de calcul des ordinateurs durant ces dix dernières années, de nouvelles méthodes de modélisation ont pu être développées, parmi lesquelles les méthodes dites de Monte-Carlo et de dynamique moléculaire. La méthode de Monte-Carlo repose sur les probabilités assignées aux processus concernés et permet d'aborder l'étude des mécanismes de dissolution au niveau microscopique tout en maintenant un bon compromis entre simplicité et temps de calcul. C'est l'une des voies de recherche récemment recommandées en matière de modélisation. Elle ne prétend toutefois pas se substituer aux modèles analytiques, qui restent actuellement les outils de base pour évaluer la durabilité des verres en conditions de dépôt. La méthode de dynamique moléculaire se réfère quant à elle au potentiel d'interaction calculé à partir de la loi de Newton ($F = m \cdot a$). Elle est plus précise, mais a le désavantage de n'admettre que des pas de calculs très petits ($t < 10^{-10}$ s).

Compte tenu des incertitudes qui subsistent quant à la durabilité des verres dans l'Argile de Boom, on admet de façon conservatrice dans les évaluations de sûreté à long terme que le système verre-eau-argile n'évolue pas vers l'établissement de conditions de saturation. Nonobstant cette hypothèse, la durabilité des verres dans les conditions d'un dépôt final est de plusieurs dizaines de milliers d'années, la durabilité minimale calculée à partir de la vitesse de dissolution maximale théoriquement possible (vitesse initiale V_0 correspondant à une concentration nulle en acide silicique en solution) étant d'environ 10 000 ans. Dans la mesure où les évaluations de sûreté montrent que cette durabilité n'a pas d'impact significatif sur le flux des radionucléides à l'interface entre l'Argile de Boom et les aquifères, les faibles répercussions potentielles sur la sûreté à long terme d'une diminution significative des incertitudes qui l'entourent ne justifient toutefois pas les moyens considérables qu'il conviendrait de mettre en œuvre pour y parvenir.

Les programmes de recherche futurs relatifs aux verres devront démontrer le caractère ultra conservatif de la limite inférieure de durabilité retenue dans le cadre de la modélisation du champ proche, et non en déterminer une valeur absolue. Ils viseront à apporter des arguments qualitatifs ou semi-quantitatifs convaincants montrant que la durabilité des verres sera très vraisemblablement de l'ordre de plusieurs centaines de milliers d'années, soit au moins un ordre de grandeur supérieur à l'hypothèse minimaliste, ce qui permettra également d'estimer la réserve de sûreté associée à cette durabilité. Ils viseront également à démontrer que l'ajout de fritte de verre dans le champ proche améliorerait la durabilité. Ils comprendront principalement les études suivantes :

- interprétation des phénomènes observés dans des conditions dites de saturation ;
- identification des mécanismes contrôlant la dissolution des verres sur le long terme ;
- extension de l'étude relative au comportement à la lixiviation des radionucléides à d'autres éléments considérés comme critiques ou potentiellement critiques (^{79}Se , ^{126}Sn , ^{107}Pd et ^{93}Zr) ;
- élaboration d'un modèle géochimique et d'un modèle analytique ;
- évaluation des modèles par le biais de trois démarches complémentaires : simulation des mécanismes de dissolution à l'échelle microscopique par la méthode Monte-Carlo, tests de démonstration in situ de longue durée (déjà commencés) et étude d'analogues naturels dans des conditions représentatives de l'Argile de Boom non perturbée. (Des verres volcaniques basaltiques, dont il a été démontré que le comportement est représentatif de celui des verres nucléaires, ont été trouvés dans l'Argile de Boom. Ils présentent la caractéristique très intéressante de ne comporter aucune figure de dissolution.)

3.4.1.2 Combustibles usés

Une première étude portant sur la solubilité de l' UO_2 dans l'Argile de Boom en fonction de paramètres clés tels que les concentrations en carbonate et en carbone organique dissous indique que la matière organique n'a pas d'influence significative sur la solubilité de l'uranium,

qui est très faible en milieu réducteur (environ 10^{-8} mol.l⁻¹). L'influence des carbonates ne se marque que pour des conditions rédox moins sévères (complexation de l'uranium hexavalent alors présent en solution). La matrice UO₂ devrait, d'après les données rapportées dans la littérature, être également caractérisée par une durabilité significative au regard des échelles de temps prises en compte dans les évaluations de sûreté.

Nonobstant l'importance des combustibles usés, peu de données existent actuellement dans la littérature quant à leur comportement en milieu argileux. C'est ainsi que la première évaluation de sûreté, récente, relative à la mise en dépôt de combustibles usés dans l'Argile de Boom a utilisé, pour la définition du terme source, une extrapolation à l'argile des données inhérentes au granite. L'étude du comportement des combustibles usés est en outre rendue difficile par le fait qu'elle doit prendre en considération différents composants, chacun étant caractérisé par un taux de relâchement et un inventaire isotopique spécifiques, ce qui oblige à des simplifications pour les évaluations de sûreté. Elle porte en priorité sur la matrice UO₂, qui renferme bien entendu l'essentiel de l'activité.

Une revue critique de la littérature a récemment permis de définir un premier programme de recherche et développement conséquent consacré au comportement du combustible UO₂ dans l'Argile de Boom et destiné à valider le terme source utilisé dans les évaluations de sûreté, à y apporter les adaptations éventuellement requises, ce qui implique la connaissance des mécanismes de dissolution qui opéreront (fig. 3.33), et à étudier les aspects liés à la justification des simplifications nécessaires pour les évaluations de sûreté. Dans un premier temps, les études porteront, non pas sur du combustible usé, mais sur de l'oxyde d'uranium et sur de l'oxyde d'uranium dopé avec des émetteurs alpha afin de simuler la composition chimique d'un combustible usé à l'oxyde d'uranium caractérisé par un taux de combustion élevé (SIMFUEL). Des conditions représentatives de celles qui prévaudront en dépôt en profondeur seront appliquées. Ce programme, qui s'inscrit dans un contexte international via la participation aux programmes cadres de la Commission européenne, couvre les tâches suivantes :

- revue critique des données disponibles relatives à la caractérisation des combustibles usés à l'oxyde d'uranium et des combustibles usés MOX ;
- détermination de la vitesse de dissolution du SIMFUEL dans les conditions qui régneront à six périodes différentes de l'évolution du système de dépôt s'échelonnant entre 500 et plus de 100 000 ans et détermination de la relation entre l'activité alpha du SIMFUEL et sa vitesse de dissolution dans l'Argile de Boom ;
- détermination de l'influence des minéraux argileux sur la vitesse de dissolution du SIMFUEL (possibilité d'accroissement de la vitesse de dissolution par adsorption des espèces U(VI) ou U(IV) libérées dans le milieu) ;
- étude de la compatibilité des différents matériaux envisagés pour les barrières ouvragées avec le SIMFUEL ;
- modélisation géochimique et cinétique, la modélisation cinétique nécessitant tout d'abord une revue critique et une sélection de modèles existants, après quoi elle passera à un premier calcul de durabilité des combustibles usés en tenant compte des paramètres spécifiques à l'Argile de Boom.

Des tests intégrés en laboratoire de surface avec du combustible usé réel ainsi que des tests in situ avec du SIMFUEL devraient être entrepris à moyen terme, sous réserve d'obtention des autorisations requises. Les apports potentiels des analogues naturels seront également examinés.

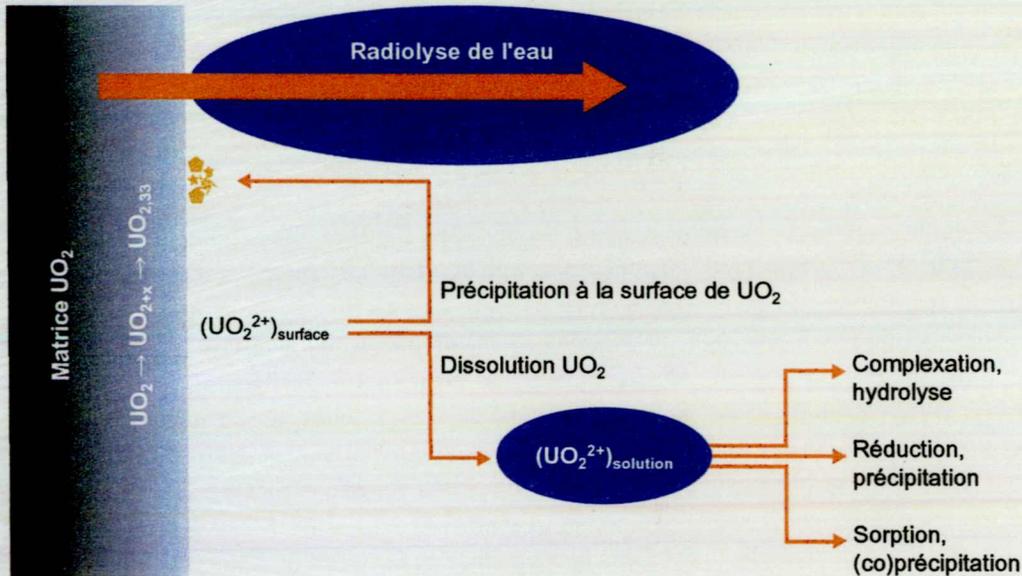


Figure 3.33 Représentation des mécanismes de dissolution de la matrice UO_2 .

3.4.1.3 Gains et embouts

Aucune étude n'a été entreprise à ce jour quant au comportement dans l'Argile de Boom des gaines et embouts et des déchets technologiques issus du retraitement. En effet, ces déchets ne seront pas immobilisés dans une matrice à base de ciment, mais simplement compactés et placés dans un emballage primaire identique à celui utilisé pour les déchets vitrifiés. L'absence de suremballage et de matrice de conditionnement pour cette classe de déchets amène donc à faire l'hypothèse conservatrice dans les évaluations de sûreté d'un relâchement instantané des radionucléides, hypothèse qui amène de fait une réserve de sûreté. Etant donné leur nature, ces déchets ne devraient par ailleurs pas poser de problèmes de compatibilité avec le milieu de dépôt. Ils n'ont par exemple qu'une teneur marginale en dérivés organiques. L'opportunité d'effectuer des études de compatibilité sera toutefois réexaminée dès que les critères d'acceptation de ces déchets auront été définis et que leur procédé de conditionnement aura été qualifié.

3.4.1.4 Déchets bitumés

Les deux principaux types de déchets bitumés destinés au dépôt en profondeur sont ceux de la classe MAGALC, constitués de boues de coprécipitation conditionnées dans une matrice constituée de bitume distillé (*soft bitumen*) et qui sont issus du retraitement des combustibles usés par COGEMA, et ceux de la classe MAGALE, constitués de liqueurs à haute teneur en nitrate de sodium conditionnées dans une matrice constituée de bitume soufflé ou *hard bitumen* et qui sont issus de l'ancienne installation EUROCHEMIC. Les déchets bitumés revêtent une importance particulière en raison de leur nature organique et des volumes qu'ils représentent, soit quelque 3400 m³. Vu le petit nombre de colis de déchets de la classe MAGALC (480) par rapport au nombre de colis de déchets de la classe MAGALE (environ 13400), ce sont ces derniers qui sont étudiés en priorité.

A l'exception de celles qui concernent la production des produits de dégradation de la radiolyse, peu de données sont disponibles dans la littérature quant à l'impact des phénomènes qui régissent le comportement des déchets bitumés en conditions de dépôt sur les performances du dépôt, soit que les données n'existent pas ou ne sont pas directement transposables au cas de l'Argile de Boom, soit qu'elles sont entachées d'incertitudes importantes, soit encore qu'elles sont contradictoires. Ces lacunes s'expliquent par la cinétique très lente des processus concernés (à l'exception de la lixiviation des nitrates), par la difficulté de réaliser des tests sur des colis actifs dans des conditions représentatives d'un dépôt et par les interactions entre les différents phénomènes impliqués. Enfin, il ne semble pas exister d'exemple comparable à celui des déchets de la classe MAGALE.

Les recherches bibliographiques effectuées indiquent néanmoins que le comportement des déchets bitumés en conditions de dépôt sera déterminé principalement par cinq phénomènes.

- La *lixiviation de quelque 750 tonnes de nitrate de sodium* dans l'Argile de Boom à moyen terme pourra modifier la géochimie de l'Argile de Boom dans le voisinage du champ proche et influencer la migration des radionucléides, en particulier la migration des radionucléides sensibles au potentiel d'oxydoréduction.
- Le *vieillissement* des enrobés, c'est-à-dire l'évolution de leurs caractéristiques intrinsèques (dureté, viscosité, point de ramollissement, densité, etc.) au cours du temps sous l'influence de différents facteurs, affecte la nature et l'ampleur des autres processus qui déterminent le comportement des matrices en conditions de dépôt.
- Le *gonflement* des enrobés suite à la diffusion de l'eau et l'apparition d'une pression osmotique élevée peuvent influencer les performances des barrières ouvragées.
- La *biodégradation et la radiolyse entraîneront la production de gaz et de composés organiques solubles*, qui possèdent pour la plupart une certaine capacité de complexation et pourraient le cas échéant modifier la spéciation des radionucléides et donc leur comportement dans l'argile de Boom.

Des recherches portant sur la caractérisation physicochimique et le comportement à la lixiviation des sels inactifs et des radionucléides des déchets bitumés dans diverses conditions ont été progressivement entamées à partir de la fin des années quatre-vingt et du

début des années nonante. Egalement incluses dans ces programmes, les études relatives au vieillissement, au gonflement et à la biodégradation n'en constituaient qu'un volet mineur.

Les connaissances acquises jusqu'à présent sur les déchets de la classe MAGALE, en particulier quant à leur taux de relâchement de sels solubles inactifs, indiquent que ces colis devraient peu contribuer au confinement des radionucléides dans un système de dépôt final en profondeur. Les évaluations de sûreté n'attribuent donc aucun rôle de barrière au bitume et aucune nouvelle étude n'est actuellement prévue sur ce sujet. Cette question sera toutefois réexaminée le cas échéant au regard des résultats des évaluations de sûreté afférentes.

Davantage que la durabilité, ce sont les aspects de compatibilité des déchets bitumés avec le milieu de dépôt qui sont importants dans l'étude de leur comportement. Les phénomènes considérés comme les plus critiques sont les phénomènes complexes de vieillissement et de gonflement, qui occuperont une place centrale dans les programmes futurs étant donné que les données acquises jusqu'à présent ne permettent pas d'évaluer le comportement d'un colis réel dans les conditions d'un dépôt final en profondeur. Les processus de dégradation biologique et radiolytique se traduisent quant à eux par la production de gaz et de composés organiques solubles. En ce qui concerne la production de gaz, les estimations aboutissent à une limite supérieure de l'ordre de 1 m^3 par colis sur une période de 1 000 ans. Il s'agit d'une valeur conservatrice, calculée dans les conditions standard de température et de pression en maintenant le taux initial de biodégradation constant, alors qu'il devrait diminuer drastiquement au cours du temps. (La contribution de la radiolyse est peu significative.) Par ailleurs, le principal agent complexant généré dans le milieu par la radiolyse du bitume est l'oxalate. Celui-ci n'a toutefois pas d'influence significative sur le comportement des radionucléides dans le champ proche envisagé, à savoir un matériau de remblayage à base de ciment. Les résultats partiels disponibles indiquent de même que les produits de dégradation radiolytique des déchets de la classe MAGALE n'ont pas d'influence significative sur le comportement du plutonium et de l'américium dans l'Argile de Boom. Ces études seront poursuivies et approfondies ainsi que celles relatives aux processus de biodégradation, notamment en termes de production de gaz, d'influence de l'évolution des conditions physicochimiques dans le champ proche et d'identification des populations de micro-organismes les plus susceptibles de se développer.

Certains résultats liés aux phénomènes relativement indépendants du type de matrice comme la radiolyse et, dans une certaine mesure, la biodégradation, obtenus pour les déchets de la classe MAGALE pourront être extrapolés aux déchets de la classe MAGALC. D'autres processus comme le gonflement et, le cas échéant, la définition du terme source devront faire l'objet d'études spécifiques, de même que la question de l'influence de la fluidité des matrices des déchets de la classe MAGALC sur leur comportement en conditions de dépôt. (L'étude de l'influence potentielle de la migration d'un front de nitrate de sodium sur les propriétés de rétention de l'argile a été entamée en 1999 dans le cadre du programme consacré à la migration des radionucléides dans l'Argile de Boom.)

3.4.1.5 Déchets cimentés

La durabilité des déchets cimentés n'est pas étudiée actuellement, dans la mesure où les évaluations de sûreté négligent de façon conservatrice la contribution de la matrice de ciment au confinement des radionucléides. Comme pour les déchets bitumés, les principales questions que pose la mise en dépôt des déchets cimentés sont liées à leur compatibilité avec l'Argile de Boom. Ils peuvent en effet a priori générer un front alcalin et certains flux de déchets cimentés contiennent des dérivés cellulose dont les produits de dégradation en milieu anaérobie et alcalin pourraient avoir un impact sur la solubilité et la sorption des radionucléides. Les résultats partiels de mesures de solubilité et de tests de sorption avec le plutonium et l'américium dans l'argile en présence d'acide isosaccharinique et d'autres produits de dégradation de la cellulose obtenus jusqu'à présent indiquent toutefois que ces derniers et, en particulier, l'acide isosaccharinique, n'ont que peu d'influence sur le comportement des radionucléides dans l'Argile de Boom. La contribution des matrices de déchets à l'apparition d'un front alcalin dans l'argile n'a quant à elle pas encore été abordée.

3.4.1.6 Données sélectionnées pour la modélisation du champ proche

Les paramètres requis pour la modélisation du champ proche dans les évaluations de sûreté ont fait l'objet d'une revue critique et ont été compilés dans des documents de synthèse : les *data collection forms*. Ces paramètres sont la solubilité des radionucléides dans le champ proche (matériau de remblayage et argile), le taux de fracturation des verres et leur vitesse moyenne de dissolution.

3.4.2 Le comportement des matériaux utilisés dans le dépôt en profondeur

Les matériaux constitutifs des principaux composants d'une installation de dépôt en profondeur doivent être choisis de façon non seulement à permettre à ces composants de remplir les fonctions qui leur ont été assignées, mais aussi de façon telle qu'ils soient compatibles avec les autres composants, autrement dit qu'ils n'exercent pas d'influence défavorable sur leurs performances. Ces matériaux sont essentiellement les matériaux métalliques d'emballage et de suremballage et les matériaux argileux de remblayage et de scellement.

3.4.2.1 Matériaux d'emballage et de suremballage

Etant donné que l'enthalpie libre de la réaction générique de corrosion en milieu anaérobie $x M + y H_2O \Rightarrow M_xO_y + y H_2$ est généralement négative pour les métaux usuels, la dégradation des métaux présents dans un dépôt en profondeur est inévitable à terme. Cette dégradation revêt une importance à deux égards et les mécanismes qui la gouvernent doivent donc être bien compris. Comme la corrosion implique la détérioration progressive des emballages et éventuels suremballages, la bonne compréhension et l'évaluation correcte des mécanismes et des cinétiques qui la gouvernent doit permettre de faire des choix appropriés

pour parvenir à assurer le confinement physique des radionucléides présents dans les déchets vitrifiés et les combustibles usés durant la phase thermique du dépôt, soit durant quelques centaines ou quelques milliers d'années respectivement. Comme cette corrosion s'accompagne par ailleurs d'une production d'hydrogène, qui est susceptible de perturber la formation-hôte, elle doit être étudiée pour permettre de concevoir l'architecture de dépôt de façon à maintenir les perturbations à des niveaux acceptables (voir section 3.6), en la réduisant ou en facilitant l'échappement du gaz.

Les résultats des expériences de corrosion in situ sont très différents selon le type de matériau étudié : les aciers inoxydables constitutifs des emballages déjà existants et des aciers et alliages envisagés comme matériaux de suremballage au niveau européen (un acier à bas carbone, des aciers inoxydables, du titane pur, un alliage au titane et deux alliages au nickel), qui se trouvaient dans cinq états initiaux différents. Les échantillons d'*acier inoxydable* et d'*alliages spéciaux* ne présentent aucune trace de corrosion attribuable à l'expérience, et ce, quelles que soient les conditions expérimentales. (Cette observation semble confirmée par le fait que les nombreux piézomètres en AISI 316 utilisés en contact direct avec l'Argile de Boom dans le cadre d'autres pans du programme de recherche et développement n'ont apparemment pas souffert de corrosion. Ils n'ont ceci dit pas fait l'objet d'investigations spécifiques dans ce sens.) Par contre, tous les échantillons d'*acier au carbone* testés présentent des traces notables de corrosion généralisée et par piqûres. Profondeur des piqûres et épaisseur de la couche corrodée dépendent de la température et de la durée d'exposition. Alors que les échantillons polis sont beaucoup moins sujets aux piqûres que les échantillons testés tels quels, du fait qu'ils présentent initialement beaucoup moins de défauts de surface, ces derniers présentent une piqûration continue, avec coalescence des piqûres. Cette morphologie s'explique par la succession de deux mécanismes. Durant une première phase, dite aérobie, l'oxygène qui s'est dissous dans l'eau interstitielle lors du creusement dans l'argile des forages nécessaires à la mise en place des tubes porte-échantillons induit une corrosion qui s'effectue principalement, sinon uniquement, par piqûres. Après rétablissement, en quelques mois, des conditions initiales plutôt réductrices, le mécanisme prépondérant devient un mécanisme de corrosion uniforme, qui tend en quelque sorte à lisser la surface exposée. (En situation réelle, la période aérobie consécutive à la construction du dépôt sera nettement plus longue, puisque l'argile aura été plus fortement perturbée chimiquement, et la profondeur des piqûres pourrait dès lors augmenter significativement.)

Les cinétiques défavorables de corrosion par piqûres et de corrosion homogène de l'acier au carbone le rendant inapte à servir de matériau de suremballage, les travaux se sont alors orientés vers l'étude en laboratoire de deux autres matériaux relativement courants et compatibles avec l'acier de l'emballage des déchets : les aciers inoxydables austénitiques AISI 316L hMo (considéré comme référence et nuance de l'AISI 316 déjà testé in situ) et UHB 904L, plus fortement allié et déjà testé in situ. Cette étude paramétrique qui comprend deux types d'essais investigate de manière systématique l'influence du matériau environnant (Argile de Boom ou mélange de remblayage argile FoCa-sable-graphite), de la température (de 16 à 140°C) ainsi que de teneurs représentatives en oxygène, en chlorures, en thiosulfates et en sulfates, ces deux derniers composés pouvant être générés lors de l'oxydation de la pyrite suite à l'excavation de l'Argile de Boom. Les essais électrochimiques

visent à déterminer les différents potentiels caractéristiques de la corrosion par piqûres, pour permettre d'en évaluer la probabilité. Les essais d'immersion, eux, consistent à placer des échantillons d'AISI 316L hMo ayant subi différents types de pré-traitement en contact avec le matériau de remblayage dans des conteneurs hermétiques saturés en solutions de compositions différentes, représentatives de l'évolution des conditions attendues dans le champ proche au cours du temps (transformation des conditions aérobies en conditions anaérobies, diminution progressive de l'influence de l'argile FoCa sur la chimie de l'eau interstitielle au profit d'une influence croissante de l'Argile de Boom et diminution de la température). La corrosion par crevasses ainsi que l'éventuelle corrosion galvanique favorisée par la présence de graphite dans le matériau de remblayage sont aussi examinées. Leur durée est de deux ans maximum, avec prélèvements à des durées intermédiaires.

La majorité des résultats obtenus jusqu'à présent sont des résultats d'essais électrochimiques en milieu oxydé. Les plus marquants sont ceux relatifs à l'AISI 316L hMo à 90°C :

- l'augmentation de la teneur en chlorures favorise la corrosion par piqûres ;
- inversement, l'augmentation de la teneur en sulfates diminue la corrosion par piqûres ;
- les thiosulfates ne semblent favoriser significativement la corrosion par piqûres qu'à partir de 50 ppm.

Les mêmes essais à 16°C ne donnent lieu à une piqûration que pour des teneurs en chlorures de 10 000 ppm, c'est-à-dire des teneurs 1 000 fois plus élevées que la teneur en chlorures de l'eau interstitielle de l'Argile de Boom et 10 fois plus élevées que celle des Argiles Yprésiennes. Enfin, l'acier UHB 904L présente systématiquement une meilleure résistance à la corrosion par piqûres que l'AISI 316L hMo dans les milieux testés. (Les premiers échantillons récupérés des essais d'immersion n'indiquent aucun phénomène de corrosion.)

Outre la poursuite des études en cours, le programme futur s'attachera à optimiser le choix du matériau de suremballage après, d'une part, avoir étudié de manière plus approfondie les différents types de corrosion susceptibles de prendre place, ceci afin de définir le mode d'attaque le plus vraisemblable et le plus pénalisant, et, d'autre part, avoir étudié les aspects de mise en œuvre pratique et, notamment, la soudabilité. Cette optimisation se fera dans le cadre d'une approche intégrée prenant en compte l'ensemble des paramètres susceptibles d'influer sur la corrosion et nécessitera en particulier une meilleure compréhension de l'évolution de la géochimie du milieu au cours du temps.

3.4.2.2 Matériaux de remblayage et de scellement

Le principe d'une architecture robuste suppose que la présence du *matériau de remblayage* ne contribue pas seulement à la stabilité géomécanique du système de dépôt final et à l'évacuation de la chaleur, mais également, si possible, à sa sûreté globale (voir aussi section 3.3.1 et table 3.7). Un choix judicieux de la composition de ce matériau est en effet susceptible d'améliorer sensiblement la performance des barrières ouvragées et, par conséquent, de l'ensemble du dépôt. Ainsi le matériau de remblayage peut

- contribuer à créer un milieu géochimiquement favorable à une limitation des phénomènes de corrosion des emballages étanches ;

- contribuer à créer un milieu géochimiquement favorable à une limitation des phénomènes de lixiviation des matrices des déchets ;
- favoriser l'évacuation des gaz produits par corrosion anaérobie, par radiolyse et, le cas échéant, par biodégradation des composants organiques ;
- contribuer au confinement et à la rétention des radionucléides dans le champ proche.

La nature du matériau de remblayage envisagé varie selon le type de galerie à combler et le type de déchet à confiner.

- Pour les galeries de dépôt destinées aux déchets vitrifiés et aux combustibles usés, le matériau de remblayage devra posséder une conductivité thermique suffisante pour permettre un transport efficace de la chaleur sur son épaisseur et éviter ainsi une augmentation de température trop importante au niveau de l'emballage du déchet et du déchet lui-même. Le matériau étudié actuellement est un mélange à base d'argile gonflante FoCa, une argile de type bentonitique extraite dans la région de Fourges-Cahaignes, dans le bassin parisien, qui est chimiquement compatible avec l'Argile de Boom et qui peut facilement atteindre une pression de gonflement comprise entre 4 et 5 MPa, selon la densité de compaction, soit l'ordre de grandeur de la pression lithostatique. Ce mélange, qui est celui qui sera utilisé dans l'expérience de démonstration PRACLAY, est composé de 60 % en poids d'argile gonflante, 35 % de sable et 5 % de graphite. L'ajout de sable permet de limiter le gonflement total afin d'éviter une surcompression de la zone environnante. L'ajout de graphite permet d'augmenter la conductivité thermique du mélange de 1.5 à $4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Enfin, l'incorporation de fritte de verre pourrait ralentir la lixiviation de la matrice des déchets vitrifiés.
- Pour les galeries de dépôt destinées aux autres déchets du groupe géologique dont la matrice est en ciment, on envisage d'utiliser un matériau de remblayage similaire à la matrice du déchet, c'est-à-dire à base de liant hydraulique, qui présente l'avantage que de nombreux radionucléides présents dans les déchets, en particulier les actinides, sont peu solubles en solution alcaline. Ce matériau de remblayage pourrait toutefois entraîner une altération des propriétés de rétention de l'argile environnante par la diffusion d'un front alcalin en provenance du dépôt et a une tenue mécanique potentiellement moins bonne que les mélanges à base d'argile gonflante.
- Pour la galerie de liaison, les galeries principales et les puits d'accès enfin, le matériau de remblayage doit avoir un comportement rhéologique apte à assurer la stabilité mécanique ainsi qu'une compatibilité chimique optimale avec la formation argileuse environnante. Ce pourrait être un mélange de sable et d'argile FoCa.

Le *matériau de scellement* est appelé à jouer un rôle important dans la fonction de sûreté de retard et d'étalement du relâchement. Celui actuellement étudié est un mélange de pastilles et de poudre d'argile gonflante FoCa. Outre son excellente capacité de gonflement, cette argile possède d'excellentes propriétés rhéologiques, dont la capacité de s'autocolmater par plasticité en cas de fissuration. Ses propriétés de rétention des radionucléides et de diffusion sont semblables à celles de l'Argile de Boom. Une conductivité hydraulique de $10^{-12} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (soit l'ordre de grandeur typique pour l'Argile de Boom) peut être facilement atteinte pour le mélange considéré.

Bien qu'il n'existe pas encore d'études détaillées sur le remblayage et le scellement des galeries principales et des puits, plusieurs expériences de remblayage et de scellement ont déjà été réalisées dans le laboratoire souterrain HADES. La plus récente, l'expérience européenne RESEAL, lancée en 1996, a, dans un premier temps, visé à déterminer de manière théorique les exigences générales de développement pour le scellement d'un puits d'accès. Sa phase expérimentale, toujours en cours, a essentiellement pour but de démontrer qu'il est possible de boucher une galerie de diamètre représentatif, à savoir le petit puits, avec un matériau formé d'un mélange de pastilles et de poudre d'argile gonflante FoCa, possédant une conductivité hydraulique suffisamment faible pour éviter la migration préférentielle de l'eau et des gaz le long du soutènement du puits ou de la zone perturbée et capable de conserver sa stabilité mécanique en cas de surpression accidentelle due par exemple à la génération de gaz au sein du dépôt. La conductivité hydraulique atteinte en pratique par le scellement est de l'ordre de 10^{-13} m.s⁻¹.

Enfin, étant donné le volume considérable des excavations, les *matériaux de remblayage et de scellement* devront pouvoir être fabriqués et installés à l'échelle industrielle et à un coût acceptable, et les techniques de mise en œuvre devront être judicieusement sélectionnées et correctement appliquées afin de ne pas augmenter de manière significative les perturbations géomécaniques de la formation environnante.

Les travaux relatifs aux matériaux de remblayage et de scellement bénéficient des études internationales en matière de comportement des bentonites, qui sont considérées dans la plupart des programmes étrangers de mise en dépôt. Le programme futur visera à optimiser le choix des matériaux de remblayage et de scellement en fonction des différentes fonctions qu'ils doivent assurer dans le système de dépôt. Pour le matériau de remblayage, cette optimisation tiendra tout particulièrement compte de la nécessité d'établir un environnement capable de prévenir la corrosion des suremballages. Elle bénéficiera directement des enseignements tirés de la réalisation de la maquette OPHÉLIE.

3.5 Le comportement des radionucléides dans l'Argile de Boom

L'étude théorique et expérimentale ainsi que la compréhension et la modélisation de la migration des radionucléides au sein de l'Argile de Boom, et en particulier des phénomènes de rétention, revêtent une importance cruciale depuis le début du programme de recherche et développement de l'ONDRAF consacré au dépôt en profondeur. Comme l'ont montré de manière récurrente les évaluations de sûreté à long terme (voir chapitre 4), l'Argile de Boom constitue en effet la principale barrière à la migration des radionucléides depuis les déchets mis en dépôt jusque dans la biosphère. La nécessité d'une meilleure compréhension des mécanismes de migration s'est toutefois imposée suite notamment à la constatation de l'impossibilité d'interpréter de manière satisfaisante les tests de migration et de décrire le comportement de certaines classes d'espèces dans l'Argile de Boom au moyen des modèles existants, qui considéraient entre autres une sorption réversible et un équilibre thermodynamique sans limite de solubilité et qui avaient conduit à une évaluation erronée des paramètres de migration, principalement du facteur de retard R . Les deux principaux objectifs du programme de recherche et développement 1990–2000 en matière de migration étaient donc de comprendre et de prédire le comportement des radionucléides dans l'Argile de Boom et, en particulier,

- d'identifier les mécanismes de base qui gouvernent la migration ;
- de réévaluer les paramètres de migration nécessaires aux évaluations de sûreté à long terme.

Deux types de tests permettent classiquement d'étudier la migration des radionucléides dans l'argile et de déterminer les valeurs de leurs paramètres de migration, c'est-à-dire de la porosité accessible à la diffusion η , du facteur de retard R et du coefficient de diffusion apparent D_{app} : ce sont les tests de diffusion, dans lesquels le moteur de la migration est l'existence d'un gradient de concentration, et les tests de percolation, dans lesquels le moteur de la migration est un gradient de pression hydraulique appliqué artificiellement. Une nouvelle technique, la technique d'électromigration, c'est-à-dire de migration forcée sous un champ électrique, qui permet d'obtenir également des informations sur la spéciation des espèces diffusantes en solution, est actuellement en cours de développement et son applicabilité a déjà été testée avec succès dans un certain nombre de cas. Elle complète utilement les tests classiques en permettant d'obtenir les paramètres de migration par une méthode qui repose sur une approche totalement différente, réduisant ainsi le risque d'artefact expérimental.

Les recherches sur la migration sont conduites en parallèle dans les laboratoires de surface et dans le laboratoire souterrain HADES, les tests réalisés dans le laboratoire souterrain ayant pour objectifs

- de vérifier l'applicabilité des paramètres de migration déterminés en laboratoire de surface aussi bien pour les espèces peu ou non sorbées que pour les espèces fortement immobilisées ;
- de tester les modèles de migration à grande échelle (augmentation linéaire de l'échelle d'un facteur 50 entre les tests en laboratoire de surface réalisés sur des carottes d'argile et les tests *in situ* réalisés dans le laboratoire souterrain). Cette partie du programme ne concerne que les espèces peu ou non sorbées (eau tritiée ou HTO, Γ , HCO_3^- , matière

Espèces Terme très général pouvant désigner les particules, atomes, composés définis, ions ou molécules présents dans un milieu.

Spéciation Description des quantités et sortes d'espèces, formes ou phases chimiques présentes.

Sorption Phénomène de surface générique, indépendant des mécanismes impliqués, pouvant recouvrir des processus d'absorption ou d'adsorption, ou une combinaison des deux.

Solubilité Concentration maximale d'un élément mesurée en solution pour le système considéré, dans des conditions physico-chimiques bien définies. La concentration en solution des ions constitutifs de la phase contrôlant la solubilité est déterminée par la constante d'équilibre de dissolution (produit de solubilité) et les constantes d'équilibre de formation de toutes les autres espèces (constantes de complexation).

Facteur de retard

Terme recouvrant les phénomènes de physisorption et de complexation de surface sur des groupes fonctionnels de l'argile, lesquels incluent notamment la sorption linéaire réversible et non réversible, les échanges ioniques et les échanges de ligands.

Porosité accessible à la diffusion

Fraction, pour l'espèce considérée, de la porosité totale saturée en eau disponible pour la migration par diffusion.

organique mobile), l'utilisation d'espèces fortement immobilisées étant impossible vu les très longues durées nécessaires à leur migration.

Les recherches sur la migration sont supportées, d'une part, par des exercices de modélisation conceptuelle et numérique et, d'autre part, par des participations à des initiatives internationales visant notamment à tester et à comparer les modèles utilisés et à établir des banques de données de qualité. La modélisation géochimique contribue également à l'interprétation des tests de migration (détermination de la spéciation et de la solubilité des espèces dans l'argile).

Les espèces à prendre en compte dans les expériences de migration sont déterminées avant tout par les résultats des évaluations de sûreté à long terme. Elles se répartissent en deux catégories, qui se présentent comme suit au début des années nonante :

- *les radionucléides critiques*, c'est-à-dire ceux qui induisent le maximum d'impact radiologique : ^{14}C , ^{99}Tc , ^{129}I , ^{135}Cs et ^{237}Np .
- *les radionucléides critiques possibles* : ^{79}Se , ^{93}Zr et ^{107}Pd , ainsi que les isotopes de l'uranium, du plutonium, de l'américium et du curium.

Par la suite, conformément aux conclusions d'une première évaluation de la mise en dépôt direct des combustibles usés dans l'Argile de Boom, le radium (^{226}Ra) et le protactinium (^{231}Pa) ont été inclus dans le programme ; l'uranium, qui en faisait déjà partie, a acquis une importance toute particulière.

Vu l'influence potentielle de la matière organique sur la migration des radionucléides et, en particulier, sur celle des actinides, son étude revêt une importance équivalente à celle des radionucléides critiques. Une étude portant spécifiquement sur son rôle dans la migration des actinides a ainsi été lancée en 1995. Cette étude comprend des tests de migration avec de la matière organique marquée au ^{14}C et avec de la matière organique marquée au ^{14}C et mise en contact avec un actinide.

Ceci dit, les expériences de migration portent également sur d'autres espèces :

- celles dont l'étude permet une meilleure compréhension des mécanismes de migration opérant dans l'argile : c'est le cas des espèces peu ou non sorbées comme l'eau tritiée, le strontium (Sr^{2+}), le calcium (Ca^{2+}), les anions halogènes (Br^- , Cl^-) et des molécules organiques marquées au ^{14}C (sucrose, lactose, etc.) ;
- celles qui sont utilisées comme analogues : l'euprium, utilisé comme analogue des actinides trivalents, et de petites molécules organiques de synthèse, utilisées comme analogues de la matière organique mobile.

3.5.1 Les caractéristiques de l'Argile de Boom en matière de migration

Outre que la migration des radionucléides dans l'Argile de Boom se fait essentiellement par diffusion, c'est-à-dire qu'elle est contrôlée par les gradients de concentration et qu'elle est donc très lente, l'Argile de Boom possède une série de caractéristiques géochimiques et physicochimiques très favorables à la rétention des radionucléides :

- *milieu réducteur et légèrement alcalin* favorisant la réduction des espèces sensibles au potentiel d'oxydoréduction en espèces peu solubles ;
- *capacité d'échange cationique élevée* ;
- *ultrafiltration des colloïdes*, et notamment des colloïdes organiques auxquels sont partiellement associés certains radionucléides, qui limite ainsi leur mobilité.

3.5.1.1 Dominance de la diffusion

L'Argile de Boom à l'aplomb de la zone nucléaire de Mol-Dessel étant caractérisée par une conductivité hydraulique verticale ($K_v \approx 10^{-12} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) et un gradient hydraulique naturel (2 m de colonne d'eau sur 100 m d'épaisseur d'argile) très faibles, la migration des radionucléides y est essentiellement contrôlée par la diffusion, l'advection ne jouant qu'un rôle secondaire. Deux tests réalisés in situ dans le laboratoire souterrain illustrent très bien cette propriété, dont un, celui avec l'eau tritiée, met en jeu des échelles spatiales et temporelles importantes.

- Un test de migration à échelle métrique, débuté en 1988, démontre sans ambiguïté que la migration de l'eau tritiée relève d'un processus diffusif. Les résultats expérimentaux obtenus jusqu'à présent sont en effet en très bon accord avec les prédictions théoriques calculées à partir d'un modèle strictement diffusif utilisant les paramètres déterminés dans le cadre de tests en laboratoire de surface (fig. 3.34). Une activité est actuellement mesurée dans les filtres situés à 1 m et 2 m de part et d'autre du filtre d'injection ; aucune activité n'a par contre encore été mesurée dans les filtres disposés à 3 et 4 m du filtre d'injection.
- Un test de percolation avec du ^{134}Cs mené durant 7 ans sous un gradient hydraulique très élevé (600 à 1300, alors que le gradient naturel est de 0.02) indique un effet de percolation insignifiant (profil d'activité dans la carotte d'argile quasiment symétrique par rapport à la position initiale de la source), démontrant ainsi que, même dans ces conditions extrêmes, la migration du césium reste essentiellement déterminée par la diffusion (fig. 3.35).

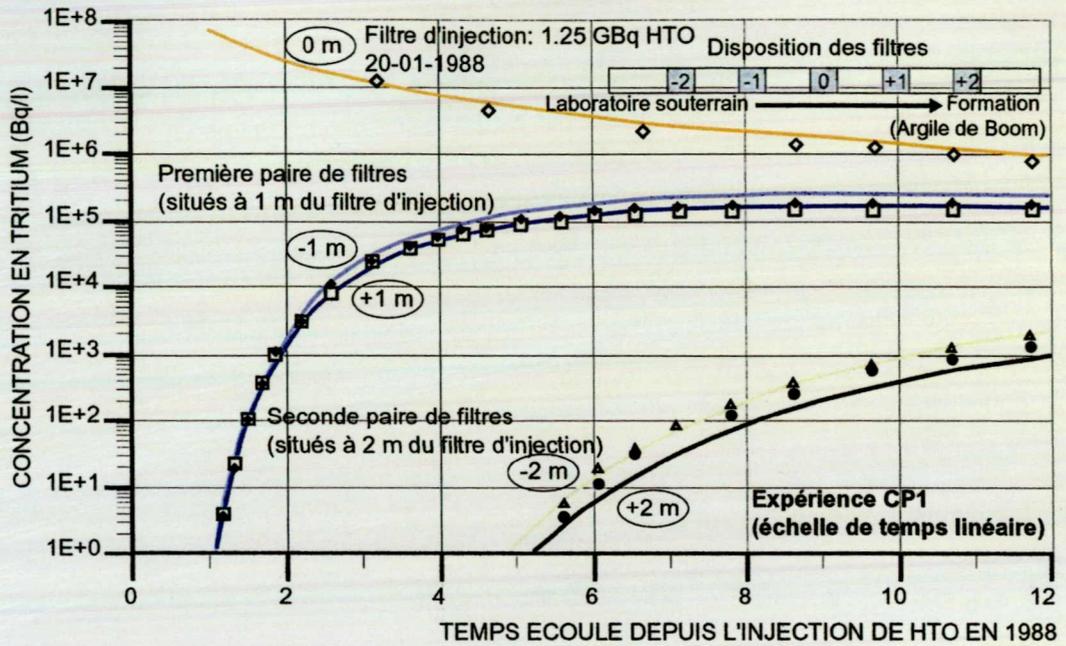


Figure 3.34 Comparaison entre résultats expérimentaux et courbes théoriques pour le test de migration in situ avec de l'eau tritiée.

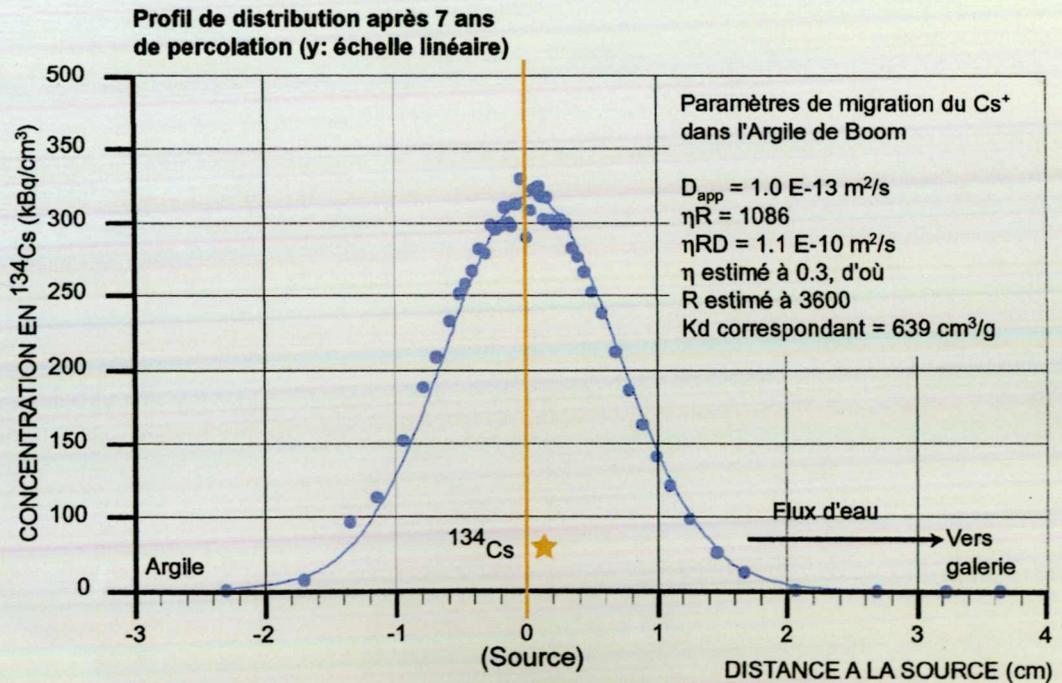


Figure 3.35 Profil de l'activité du ¹³⁴Cs dans la carotte d'argile pour le test de percolation in situ.

3.5.1.2 Caractéristiques géochimiques

L'Argile de Boom est un milieu réducteur et légèrement alcalin, favorisant la réduction des espèces sensibles au potentiel d'oxydoréduction en espèces peu solubles. Elle possède des capacités de tamponnage significatives des points de vue pH et E_h en raison de la présence de minéraux tels que la calcite, la sidérite et la pyrite à des teneurs comprises entre 1 et 5% en poids (table 3.8). Son eau interstitielle est en équilibre avec les minéraux de la phase solide (équilibre de dissolution/précipitation) depuis très longtemps, bien qu'il soit actuellement impossible de préciser avec exactitude une échelle de temps. Les équilibres d'oxydoréduction sont en place depuis le tout début de la sédimentation et ont été atteints très tôt grâce à l'activité des bactéries sulfato-réductrices et méthanogènes qui ont rapidement produit d'abord de la pyrite, ensuite du méthane.

Table 3.8 Caractéristiques de l'eau interstitielle de l'Argile de Boom.

Anions (mol·l⁻¹)	
HCO ₃ ⁻	1.36·10 ⁻²
Cl ⁻	7.61·10 ⁻⁴
F ⁻	1.89·10 ⁻⁴
HPO ₄ ²⁻	3.96·10 ⁻⁵
Br ⁻	6.13·10 ⁻⁶
SO ₄ ²⁻	2.08·10 ⁻⁶
Cations (mol·l⁻¹)	
Na ⁺	1.77·10 ⁻²
K ⁺	2.81·10 ⁻⁴
Mg ²⁺	1.19·10 ⁻⁴
Ca ²⁺	9.98·10 ⁻⁵
Fe (II/III)	1.61·10 ⁻⁵
Al (III)	2.96·10 ⁻⁶
Espèces neutres (mol·l⁻¹)	
B(OH) ₃	6.93·10 ⁻⁴
Si(OH) ₄	1.78·10 ⁻⁴
Carbone organique en solution (COC) (mg de C·l⁻¹)	41.3 à 144
Paramètres physicochimiques	
pH*	8.2 ± 0.05
E_h (mV/SHE**)	-0.250
Conductivité ionique (mS·cm ⁻¹)	1.8
Quantité totale de matière sèche (mg·l ⁻¹)	≈ 1500
Capacité d'échange cationique (CEC) pour le strontium (meq par 100 g de roche)	24 ± 3
Capacité d'échange cationique (CEC) pour le calcium (meq par 100 g de roche)	23 ± 3
Capacité rédox (meq·g ⁻¹)	2

* : mesure in situ sans perte de CO₂ au moyen d'une optode

** : potentiel d'oxydoréduction par rapport à l'électrode standard à hydrogène

L'Argile de Boom est toutefois très sensible à l'oxydation (oxydation de la pyrite s'accompagnant de la libération de sulfates et, suivant la teneur en calcite de l'environnement, d'une acidification du milieu). Ce phénomène, observé notamment lors du creusement des installations souterraines, se traduit par une modification de ses caractéristiques géochimiques, qui pourrait induire des changements au niveau de la spéciation et de la solubilité des radionucléides et modifier le comportement de la matière organique. Dans la plupart des cas, la forme oxydée des radionucléides sensibles au potentiel d'oxydoréduction (Se, Sn, Tc, U, Np, Pu) se caractérise par une solubilité significativement plus élevée. L'oxydation de la pyrite se traduit également par la formation d'oxydes de fer hydratés, lesquels possèdent une très grande capacité de sorption. La migration des espèces dans l'argile devrait être réévaluée dans le cas où l'épaisseur de la zone géochimiquement perturbée serait significative.

3.5.1.3 Interactions entre l'argile et les solutés

Les minéraux constitutifs de l'argile sont porteurs en surface d'une charge électrique négative permanente, ce qui entraîne une répulsion électrostatique des anions et une sorption des cations. La porosité accessible à la diffusion des cations et des espèces neutres ($\eta \approx 0.30$) telles que l'eau tritiée ou la silice dissoute ($\text{Si}(\text{OH})_4$) est donc supérieure à celle des anions non sorbés tels que l'ion iodure (I^- , $\eta \approx 0.12$). La sorption des cations dépend de leur affinité avec les ligands en surface, mais aussi de leur rayon hydraté et de leur charge électrique nette. Les radionucléides de nature cationique que sont Cs (I), Pd (II), Eu (III), Am (III), Cm (III) et Zr (IV), ainsi que les espèces sensibles au potentiel d'oxydoréduction et aisément réduites en espèces peu solubles (Se, Tc, U, Np, Pu) sont fortement immobilisés sur la phase solide. En ce qui concerne les anions pour lesquels un processus de sorption est observé (par échange de ligands), on postule une porosité accessible à la diffusion de 0.30.

3.5.1.4 Présence de matière organique

L'Argile de Boom contient environ 1 à 3 % en poids de matière organique, dont une très faible proportion se trouve en solution et est considérée comme mobile (≈ 0.05 %). Cette matière organique en solution, qui se compose de 70 % d'acides humiques et de 30 % d'acides fulviques et autres molécules de petites dimensions, se caractérise pour moitié environ par un poids moléculaire inférieur à 1 000.

Si la formation de complexes humiques (radionucléides–acides humiques) peut se traduire par un accroissement de la solubilité de certains radionucléides, elle peut aussi entraîner une diminution de leur concentration mobile. En effet, l'Argile de Boom, dont le diamètre moyen des pores avoisine les 5 nm, agit comme un ultrafiltre vis-à-vis des colloïdes organiques auxquels sont partiellement associés les radionucléides complexés, limitant ainsi leur mobilité. La matière organique sorbée à la surface des minéraux et immobilisée par effet de filtration de l'argile possède des capacités de sorption élevées vis-à-vis des actinides. Comme cette capacité de sorption semble être la plus élevée pour les fractions de plus haut poids

moléculaire, la sorption des radionucléides sur la composante immobile devrait être favorisée. La matière organique présente à la surface des minéraux sous forme de complexes argilo-humiques agirait en quelque sorte comme un film complexant fortement les cations métalliques. Divers processus contribuent à la formation de ces complexes argilo-humiques : les échanges de ligands, les interactions hydrophobes, les pontages cationiques ou encore l'ultrafiltration par l'argile.

3.5.2 Le comportement des radionucléides dans l'Argile de Boom

Le potentiel de rétention des radionucléides de l'Argile de Boom lors de leur migration par diffusion et par advection dépend de la nature des processus dominants de rétention et de la capacité des matériaux naturels à fixer les radionucléides, la sorption étant en général la première étape de l'immobilisation (table 3.9). Ainsi, si la précipitation est le processus dominant, la capacité de la barrière naturelle à imposer et maintenir des conditions réductrices est déterminante pour ses propriétés de rétention ; si la sorption est le processus principal, alors la concentration totale de sites de sorption est le facteur clé ; enfin, si la formation de solution solide et la co-précipitation sont les processus dominants, la teneur en calcite et autres phases minérales secondaires sont les paramètres clés.

Table 3.9 Interactions solide-solution pouvant contribuer à la rétention des radionucléides dans l'Argile de Boom, regroupées par ordre croissant de temps de réaction.

Processus de rétention des radionucléides

Processus relatifs à la migration

- Exclusion anionique
- Filtration moléculaire

Processus de sorption réversible et rapide

- Physisorption du type sorption de Van der Waals
- Complexation de surface sur des groupes fonctionnels de l'argile (sorption linéaire et non linéaire, échange ionique, échange de ligands, etc.)

Processus d'immobilisation (processus par lesquels les solutés sont incorporés dans des phases solides immobiles durant des périodes pertinentes au regard des évaluations de sûreté)

- Formation de solution solide
- Précipitation de surface
- Précipitation
- Transformation de phase (processus de vieillissement ou d'altération sous l'action de facteurs extérieurs, etc.)

Processus considérés comme ayant une cinétique très lente

- Dilution isotopique, etc.
-

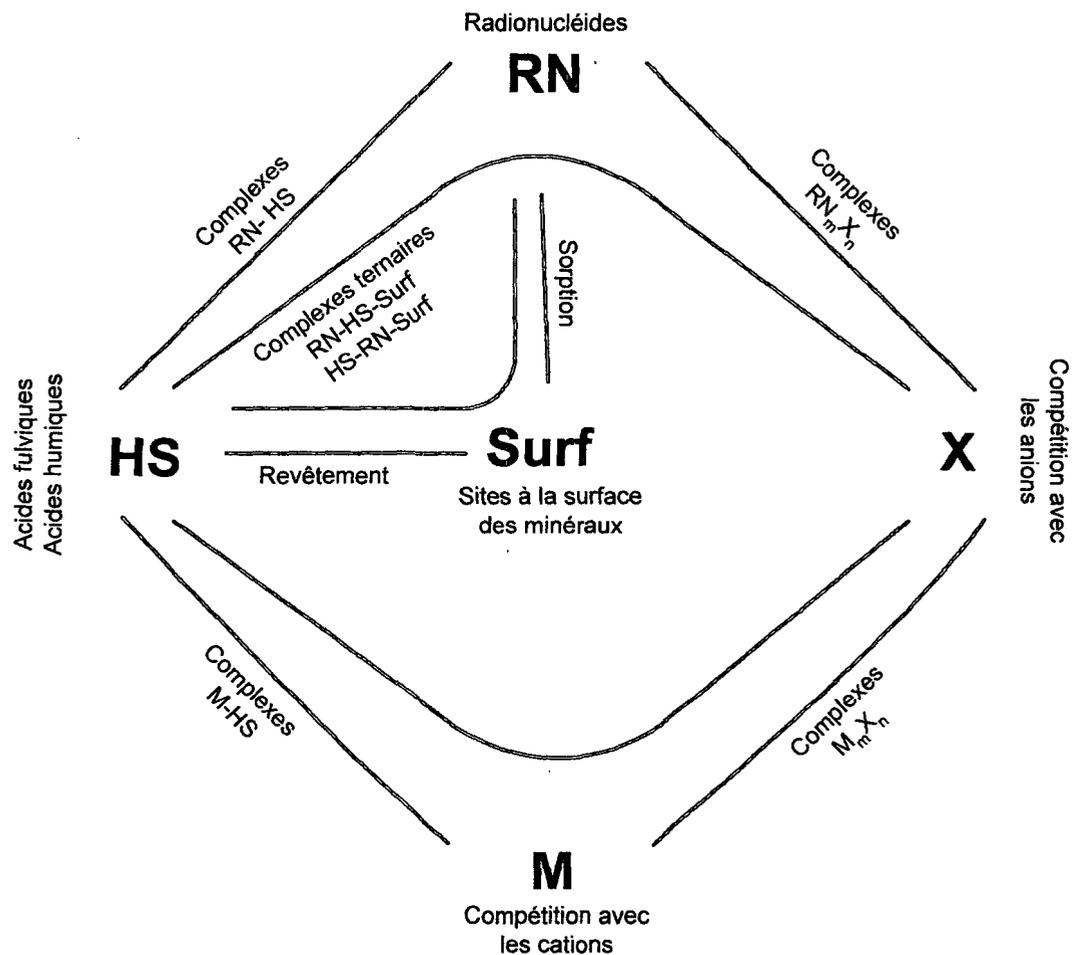


Figure 3.36 Les différentes interactions possibles entre les radionucléides et la matière organique.

Les nombreux tests de percolation réalisés en laboratoire de surface permettent de différencier le comportement des radionucléides au sein de l'Argile de Boom, qui semblent se répartir en trois groupes (fig. 3.37).

- Les produits de fission (Se, Tc et Pd) se caractérisent apparemment par une faible sorption. Leur concentration en solution semble correspondre à une limite de solubilité située aux environs de 10^{-8} mol.l⁻¹.
- Les actinides (An) faiblement sorbés (U et Np) pourraient être présents dans l'Argile de Boom sous forme neutre (An(OH)₄) et/ou de complexes carbonatés chargés négativement, ce qui expliquerait leur faible sorption. Leur concentration en solution se situe aux environs de 10^{-10} à 10^{-9} mol.l⁻¹.
- Les actinides trivalents (Am et Cm) et le plutonium trivalent ou tétravalent fortement sorbés voient leur comportement déterminé par leurs interactions avec la matière organique, qui sont les interactions prédominantes. (Dans le cas du plutonium, il s'agit d'une hypothèse inférée de la similitude du comportement des trois actinides et qui reste à confirmer.) Les concentrations en solution s'échelonnent de 10^{-14} à 10^{-12} mol.l⁻¹.

Exception faite des réactions d'hydrolyse, la chimie des actinides en solution dans l'Argile de Boom se résume à une compétition entre la complexation par les carbonates et par les acides humiques et fulviques.

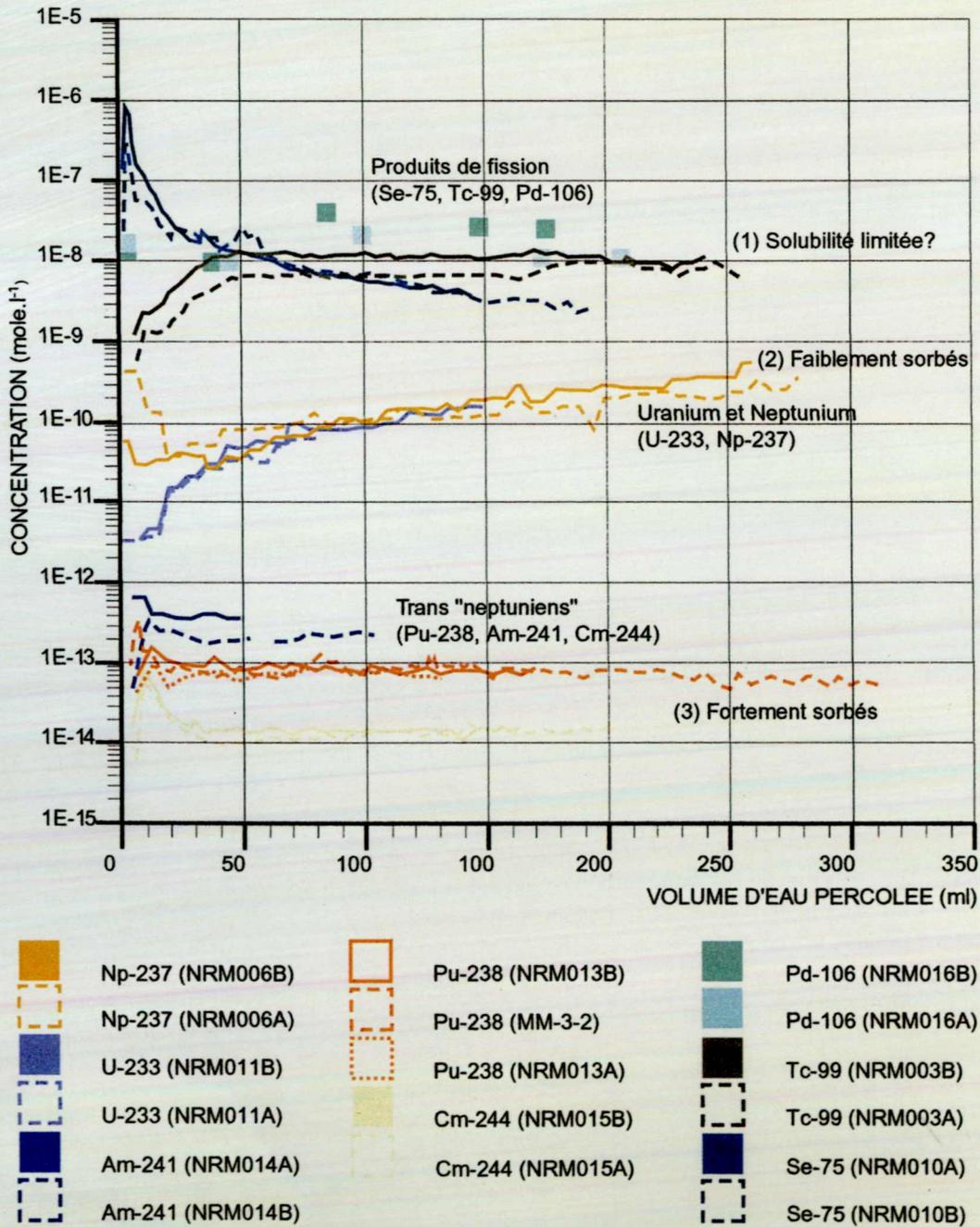


Figure 3.37 Répartition des radionucléides suivant leurs concentrations dans les solutions de percolation en fonction du temps.

La table 3.10 synthétise pour les espèces étudiées les facteurs et/ou processus déterminant leur comportement dans l'Argile de Boom.

Table 3.10 Facteurs et/ou processus déterminant le comportement des radionucléides étudiés dans l'Argile de Boom.

	I	Cs	C (HCO ₃ ⁻)	Se	Tc	Pd	U	Np	Pu	Am	Cm
E_h				+	+		+	+	+		
Matière organique									+(?)	+	+
Exclusion anionique	+		+								
Filtration moléculaire									+	+	+
Sorption		++	+(?)				+	+	++	++	++
Immobilisation (limites de solubilité)				+	+	+	+	+			

? : reste à confirmer

+ : espèce faiblement ou moyennement retardée

++ : espèce fortement retardée

3.5.3 Les paramètres de migration

Le niveau d'incertitude inhérent à la détermination des paramètres clés décrivant la migration des radionucléides dans l'Argile de Boom (η , R et D_{app}) et sur la base desquels se fondent notamment les évaluations de sûreté à long terme varie considérablement en fonction de la nature des espèces étudiées.

La détermination des paramètres de migration des espèces non sensibles au potentiel d'oxydoréduction — peu ou non sorbées (HCO₃⁻, I) et fortement sorbées (Cs⁺) — ne rencontre pas de problème particulier, l'adéquation des modèles utilisés ayant été démontrée grâce à des tests in situ à grande échelle (I, HTO) et des tests de percolation (Cs⁺) de très longue durée (voir section 3.5.1.1). Le niveau de confiance que l'on peut accorder aux valeurs sélectionnées pour le césium et l'iode est jugé satisfaisant. La valeur du facteur de retard R pour l'espèce HCO₃⁻ demeure toutefois incertaine ; elle serait très faible ($R \approx 1.5$).

L'interprétation des tests de migration pour les éléments fortement sorbés et/ou sensibles au potentiel d'oxydoréduction (Se, Tc, U, Np, Pu, Am, Cm) rencontre certaines difficultés qui amèneront à adapter les modèles de migration ainsi, le cas échéant, que les protocoles expérimentaux de préparation et de conditionnement des sources de radionucléides. En effet, les modèles spécifiquement développés pour déterminer les produits ηR et les coefficients de diffusion D_{app} à partir des résultats expérimentaux, qui prennent en compte la diffusion et l'advection et supposent une sorption linéaire et réversible, s'appliquent parfaitement pour des

éléments caractérisés par un état de valence bien défini et une solubilité élevée dans les conditions expérimentales rencontrées, mais ne permettent pas de prendre en compte les phénomènes de précipitation des éléments sensibles au potentiel d'oxydoréduction, qui sont réduits sous une forme généralement beaucoup moins soluble. Une interprétation rigoureuse des résultats expérimentaux exige de plus que soient pris en compte, outre les phénomènes de migration, les processus chimiques d'oxydoréduction (aspects cinétiques), la précipitation de phases insolubles et, le cas échéant, un processus de sorption irréversible. Quant aux protocoles expérimentaux, l'adaptation des techniques de préparation et de conditionnement des sources de radionucléides utilisées dans certains types d'expériences afin de permettre des conditions au départ proches de l'équilibre réduira significativement la complexité du système, en particulier pour les éléments sensibles au potentiel d'oxydoréduction, et donc l'interprétation et la modélisation des résultats expérimentaux. (Seuls des tests de diffusion pure ont été entrepris jusqu'ici pour certains éléments, qui ne permettent pas la détermination du produit ηR .)

3.5.4 Le rôle de la matière organique

La présence de matière organique dans l'argile de Boom constitue un facteur potentiellement important pour la migration des radionucléides, dans la mesure où elle possède un pouvoir de complexation des radionucléides, et en particulier des actinides trivalents, a priori élevé et qu'une très faible fraction de cette matière est mobile. L'étude de son comportement dans l'Argile de Boom et du comportement des complexes actinides-matière organique est donc devenue un volet essentiel des études de migration.

3.5.4.1 Capacité d'ultrafiltration de l'Argile de Boom

Des enseignements fondamentaux ont été tirés des tests de migration conduits au laboratoire de surface avec la matière organique marquée au ^{14}C : l'Argile de Boom possède une capacité de rétention des molécules organiques qui augmente avec leur poids moléculaire, autrement dit avec leurs dimensions. Elle agit comme un ultrafiltre à l'égard des molécules de poids moléculaire supérieur à 100 000 (fig. 3.38), les valeurs plus élevées du coefficient de distribution K_d (rapport entre la fraction sorbée et la fraction en solution) rapportées dans ce cas étant attribuées à des interactions hydrophobes avec la phase solide. La percolation de petites molécules lors des tests avec la fraction de poids moléculaire supérieur à 100 000 n'a toutefois pas encore pu être expliquée : soit ces molécules étaient présentes dans l'échantillon initialement injecté, soit elles ont été engendrées dans le milieu par un processus continu de scission des entités organiques plus grandes.

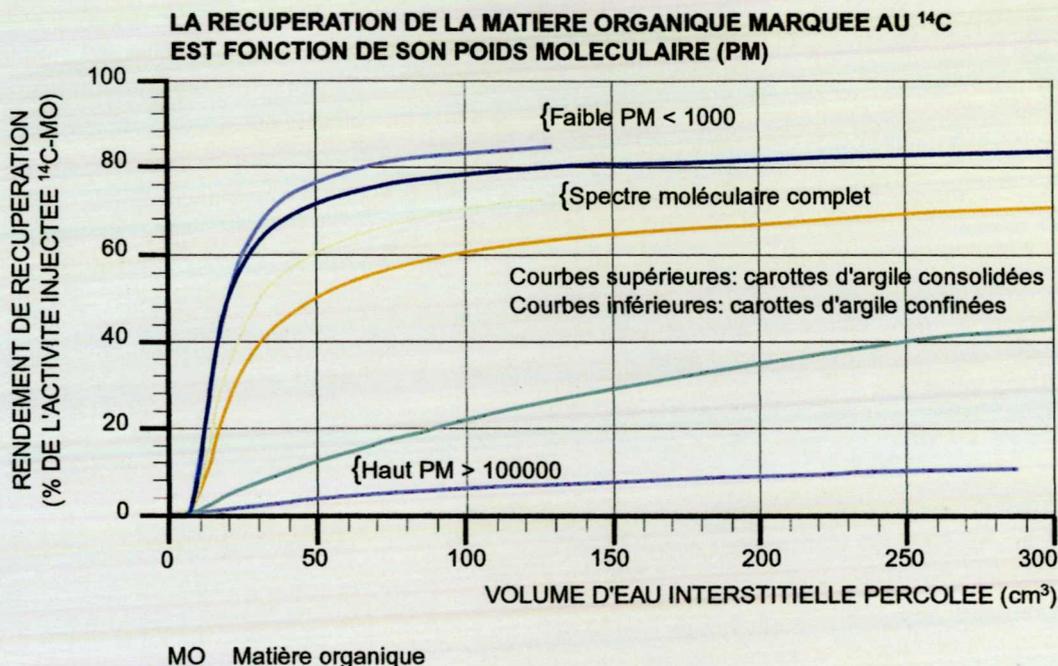


Figure 3.38 Profils d'éluion obtenus avec de la matière organique de différents poids moléculaires marquée au ^{14}C .

Les résultats des tests de migration conduits avec la matière organique ont été modélisés à l'aide du modèle de migration par diffusion-advection simple, sans prendre en compte les aspects colloïdaux. Les valeurs obtenues pour les coefficients de diffusion D_{app} sont comparables quelle que soit la fraction organique considérée, et sont en accord avec celles rapportées précédemment ($D_{\text{app}} \approx 3 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$), ce qui pourrait signifier que toutes s'apparentent à la même fraction de molécules : celles de petite dimension. De même, des valeurs relativement constantes, comprises entre 0.38 et 0.71, sont obtenues pour le produit ηR , excepté dans le cas de la fraction organique de poids moléculaire supérieur à 100 000. Un premier test in situ a débuté en 1997 (piézomètre parallèle au plan de sédimentation de l'argile) et un second en 1998 (piézomètre perpendiculaire au plan de sédimentation de l'argile) afin de vérifier l'applicabilité des paramètres de migration déterminés au laboratoire de surface et de tester les modèles de migration à grande échelle.

3.5.4.2 Comportement de l'américium

L'étude du rôle de la matière organique dans la migration des actinides dans l'Argile de Boom s'est jusqu'ici focalisée sur le comportement de l'américium, bien connu pour interagir fortement avec elle. Cette étude, effectuée avec de la matière organique marquée au ^{14}C et mise en contact avec de ^{241}Am , a d'ores et déjà fourni des résultats essentiels sur le comportement de l'américium et a permis de confirmer certaines hypothèses.

- L'américium, associé au départ à la matière organique en solution, se redistribue effectivement entre les phases liquide et solide (matière organique mobile et immobile).
- Les complexes formés par l'américium avec la matière organique en solution sont les principaux vecteurs de sa migration.
- Les complexes formés par l'américium avec les fractions de la matière organique de plus haut poids moléculaire se caractérisent par des cinétiques de dissociation plus lentes que leurs homologues de plus petite dimension.
- Le spectre moléculaire de la matière organique influence la migration de l'américium, les différentes fractions ayant des contributions différentes.

Des études complémentaires sont toutefois nécessaires pour expliquer de façon rigoureuse la différence observée entre les résultats des tests avec doubles traceurs ($^{14}\text{C} + ^{241}\text{Am}$) et ceux des tests de percolation, et ce, afin de permettre une sélection adéquate des valeurs des paramètres de migration à utiliser dans les évaluations de sûreté. La concentration en américium mesurée dans les solutions à la sortie des colonnes après un premier *breakthrough* rapide varie en effet de 10^{-12} à $5 \cdot 10^{-12} \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$ suivant les fractions organiques considérées pour les tests avec doubles traceurs, dans lesquels l'américium est introduit en solution sous forme complexée avec la matière organique, alors que les valeurs obtenues se situent aux environs de 10^{-14} à $10^{-13} \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$ pour les tests de percolation, qui utilisent un filtre imprégné d'américium disposé entre deux carottes d'argile.

Les écarts de concentration observés entre les résultats des deux types de tests sont vraisemblablement dus à des différences de cinétique directement liées aux différences entre les caractéristiques des termes sources utilisés. Il faudra démontrer que dans tous les cas, un régime stationnaire sera atteint endéans le temps de parcours de l'américium dans les premiers mètres d'argile et que la concentration mobile de l'américium sera effectivement de 10^{-14} à $10^{-13} \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$.

3.5.4.3 Comportement de l'uranium, du neptunium et du plutonium

Bien qu'on s'attende généralement à ce que la complexation des actinides par la matière organique et/ou les carbonates entraîne une augmentation de leur solubilité, les résultats acquis jusqu'à présent montrent que la matière organique en solution a peu d'effet sur la solubilité du plutonium et de UO_2 , et des études préliminaires indiquent que les carbonates n'ont pas d'influence significative sur la solubilité du neptunium et du plutonium dans les conditions in situ de l'Argile de Boom.

3.5.5 La variabilité des paramètres de migration sur l'épaisseur d'argile

Une première étude destinée à évaluer l'homogénéité verticale de l'Argile de Boom quant à ses propriétés de migration a déjà permis de conclure à celle-ci pour la migration des espèces non retardées (fig. 3.39), le cas des espèces retardées devant encore être étudié.

Concrètement, des tests de migration avec des espèces non ou peu retardées ont été réalisés sur des échantillons prélevés sur la totalité de l'épaisseur de la formation lors de la campagne de forage Mol-1 (voir section 3.2.2.2). La cinquantaine d'essais portant sur HTO et $^{131}\text{I}^-$ et la douzaine d'essais portant sur $\text{H}^{14}\text{CO}_3^-$ (soit environ une mesure tous les deux mètres dans le premier cas et une tous les dix mètres dans le second) ont fourni des valeurs situées dans la fourchette des valeurs minimales et maximales retenues pour les évaluations de sûreté à long terme.

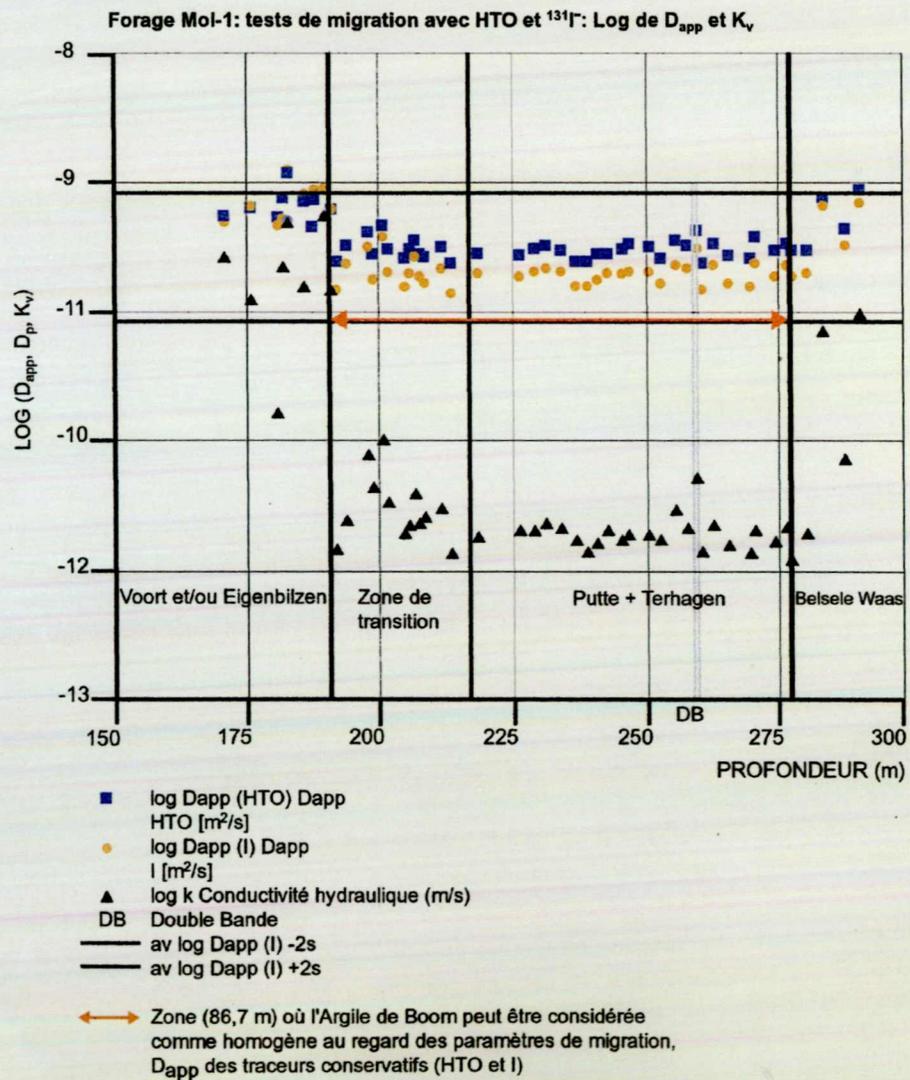


Figure 3.39 Variabilité des paramètres de migration pour les espèces HTO et I^- et de la conductivité hydraulique sur l'épaisseur de l'Argile de Boom à l'endroit du forage Mol-1.

3.5.6 Les données utilisées pour les évaluations de la sûreté à long terme

Les progrès considérables réalisés ces dix dernières années en matière de compréhension de la chimie des éléments dans l'Argile de Boom ont entraîné une révision significative des valeurs des paramètres de migration d'un certain nombre d'entre eux. Les connaissances acquises ont en effet permis de mieux cerner les différents processus contrôlant le comportement des éléments dans l'argile et de mieux rendre compte de leur contribution spécifique. Ainsi, pour les éléments caractérisés par une chimie complexe, notamment les éléments sensibles au potentiel d'oxydoréduction, l'utilisation d'une source non à l'équilibre avec le milieu dans les tests de migration induit diverses réactions préalablement à l'établissement d'un régime stationnaire. L'interprétation des résultats expérimentaux à l'aide des modèles existants a donc abouti à des valeurs erronées dans un certain nombre de cas.

Les principales avancées ayant justifié une révision significative (plusieurs ordres de grandeur dans certains cas) des valeurs des paramètres de migration sont les suivantes.

- *Distinction entre processus d'immobilisation (précipitation) et de sorption* Une confusion entre ces deux phénomènes a amené dans un premier temps à considérer que les éléments Se, Tc, U, Np sont fortement sorbés. Il apparaît toutefois aujourd'hui que la solubilité limitée du sélénium et du technétium est très probablement responsable de la rétention observée dans l'Argile de Boom. En ce qui concerne l'uranium et le neptunium, le processus d'immobilisation par précipitation reste déterminant, mais une sorption modérée semble toutefois également se manifester ($R = 40$).
- *Influence de la matière organique* La notion de solubilité opérationnelle a été introduite pour simuler la migration d'une faible fraction mobile pour les éléments trivalents (Sm, Ac, Am, Cm) et le plutonium tétravalent ou trivalent, qui migrent sans retard apparent. Elle est inférée des valeurs de concentrations mesurées dans les solutions de percolation à la sortie des colonnes et est supposée représenter la fraction mobile non retardée de l'élément considéré. Pour calculer la migration de ces éléments dans l'Argile de Boom, on postule, d'une part, une concentration en solution égale à la solubilité opérationnelle et, d'autre part, un facteur de retard R égal à 1. Pour l'uranium et le neptunium, les valeurs de solubilité et du facteur de retard R ont été calculées via la modélisation des profils d'élution des tests de percolation (*fitting parameters*). Bien qu'il s'agisse d'un cas de figure différent ($R \neq 1$), puisque ces valeurs sont inférées indirectement des valeurs de concentrations mesurées à la sortie des colonnes, par extension, on utilise également pour ces deux éléments le terme de solubilité opérationnelle.

La validité de l'approche fondée sur la notion de solubilité opérationnelle n'a pas encore été justifiée pour tous les éléments considérés. Elle semble réaliste pour les actinides et lanthanides trivalents (Sm, Ac, Am, Cm), préservant même une marge de sûreté importante. La majeure partie de ces éléments est en effet très fortement sorbée à la surface de l'argile (sorption par complexation de surface sur la matière organique associée au squelette argileux et immobilisée par ultrafiltration), ce qui réduit considérablement leur concentration en solution, seule une faible fraction étant mobile. Par conservatisme, les espèces mobiles masquées par la matière organique en solution sont supposées ne pouvoir interagir que difficilement avec la composante organique immobile. L'approche basée sur la notion de

solubilité opérationnelle est par contre à prendre avec des réserves en ce qui concerne le plutonium, dont le comportement est encore trop peu connu, et est plus incertaine encore pour l'uranium et le neptunium. Conservativement, on assigne des coefficients de diffusion moléculaire D_{app} égaux à celui de la matière organique mobile pour les éléments Sm, Ac, Am, Cm et Pu et égaux à celui de l'eau tritiée pour les éléments U et Np.

Nonobstant les progrès réalisés dans la compréhension des mécanismes déterminant le comportement des radionucléides dans l'argile, l'élaboration d'une banque de données de référence uniques pour les valeurs de leurs paramètres clés de migration apparaît actuellement prématurée, vu les incertitudes qui subsistent encore pour certaines classes d'éléments. Aussi, dans les évaluations de sûreté, trois sets de données reflétant l'évolution de la situation en matière de compréhension de la chimie des éléments dans l'argile ont été utilisés :

- *set 1* : forte sorption considérée pour les éléments Se, Tc, U et Np ainsi que pour les actinides et lanthanides trivalents (la fraction mobile n'est pas prise en compte) ;
- *set 2* : R est pris égal à 1 pour les éléments Se et Tc (et prise en compte d'une limite de solubilité) ;
- *set 2'* : application de la notion de solubilité opérationnelle pour les éléments Ac, Pu, Am, Cm et Sm ($R = 1$) et prise en compte d'une limite de solubilité et d'une sorption modérée pour les éléments U et Np ($R = 40$).

La base de données établie pour les différents éléments concernés sous la forme de *data collection forms* sur base d'une revue critique approfondie portant aussi bien sur les résultats obtenus dans le cadre des programmes réalisés par le CEN-SCK que sur les valeurs extrapolées à partir de données rapportées dans la littérature est toutefois actualisée en permanence en fonction des nouveaux résultats obtenus.

3.5.7 Les perspectives

Les programmes futurs en matière de migration s'inscriront dans la continuité des études entreprises et viseront à améliorer la compréhension de la chimie des éléments dans l'argile afin d'améliorer la sélection des valeurs des paramètres de migration, l'interprétation des tests et l'adaptation des modèles afférents. Ils porteront notamment sur

- la détermination de l'état de valence du Pu et de l'U ;
- l'étude de l'influence de la matière organique sur la migration du Pu, de l'U, du Np, de l'Am, du Cm, du Se, du Tc, du Pd et du Zr ;
- la démonstration de la pertinence du conservatisme de l'approche fondée sur la notion de solubilité opérationnelle pour le Pu, l'Am et le Cm ;
- la détermination des mécanismes responsables du retard pour l'U, le Pd et le Zr ;
- l'étude de la spéciation de l'U, du Np, du Pd, du Zr, du Se et du Tc ;
- la détermination de la solubilité du Se et du Tc ;
- la détermination du comportement et des paramètres de migration d'éléments nouvellement considérés suite aux résultats des évaluations de sûreté, comme le Sn et le

Pa, ce dernier étant bien connu pour être très fortement sorbé sur de nombreux matériaux ;

- la confirmation ou l'infirmité du faible retard supposé de l'ion bicarbonate et l'identification, le cas échéant, du mécanisme responsable de ce retard ;
- l'étude de l'influence de la migration de fronts chimiques et/ou d'espèces complexantes générés par le champ proche sur les propriétés de rétention de l'argile ;
- la diminution des incertitudes sur les paramètres pH et E_h ;
- la poursuite de l'étude de l'homogénéité verticale de l'Argile de Boom du point de vue de ses propriétés de migration avec des éléments représentatifs des différentes familles d'éléments concernés, et notamment des espèces retardées (sensibles au potentiel d'oxydoréduction et/ou à la présence de matière organique et/ou fortement sorbés) ;
- la caractérisation de la matière organique, principalement en ce qui concerne sa mobilité en solution, les échanges entre fractions mobile et immobile, et les processus de maturation qui gouvernent son évolution au cours du temps. A terme, la caractérisation de la matière organique doit permettre de répondre à la question fondamentale de savoir si elle est continûment relâchée en solution à partir du pôle immobile ou si la matière organique dissoute est immobile.

Les paramètres de migration seront également déterminés via la technique d'électromigration en tant qu'alternative et contrôle indépendant des méthodes actuelles. Enfin, les tests de migration avec les éléments fortement retardés (tests de longue durée) seront poursuivis.

3.6 Les perturbations induites dans l'Argile de Boom et son environnement

3.6.1 Les perturbations thermiques

Les effets thermiques des déchets calorifiques, c'est-à-dire principalement des déchets vitrifiés et des combustibles usés, ont, ces dix dernières années, fait l'objet d'études à la fois expérimentales et théoriques. Après la période de refroidissement préalable à leur mise en dépôt final, actuellement fixée à 50 ans, mais qui pourrait être portée à 60 ans, ces déchets continueront en effet à générer une puissance thermique significative durant encore plusieurs centaines à plusieurs milliers d'années. L'augmentation de température qui en résultera aura un impact à la fois sur le champ proche et sur le champ lointain. Cet impact, qui dépendra de l'amplitude et de la durée du réchauffement, pourra avoir des répercussions sur l'ensemble de l'architecture de dépôt final s'il s'avère qu'il entame prématurément l'intégrité des barrières ouvragées ou de la barrière naturelle. Dans l'état actuel des connaissances, le réchauffement dû à la présence des déchets calorifiques ne remet toutefois pas en cause la faisabilité de l'architecture de dépôt final et est compatible avec le dimensionnement prévu pour le dépôt et les matériaux sélectionnés. En outre, une modification de la géométrie des installations de dépôt permettra, le cas échéant, de réduire l'impact thermique des déchets sur le champ lointain. L'expérience de démonstration PRACLAY devrait fournir des informations complémentaires très pertinentes dans ce domaine.

3.6.1.1 Les études expérimentales

La détermination des propriétés thermiques de la formation-hôte est essentielle en vue de l'évaluation des perturbations éventuellement causées par la présence de déchets émetteurs de chaleurs. Sur la base d'expériences in situ, on constate que l'Argile de Boom saturée se caractérise par une faible capacité à dissiper la chaleur reçue. Ainsi, sa conductivité thermique est au maximum de $1.7 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ (en comparaison, l'acier au carbone présente une conductivité aux environs de $50 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$). Cette particularité constitue une des contraintes importantes pour la conception des installations de dépôt (voir section 3.3).

L'expérience CERBERUS, menée de 1987 à 1998, constitue la principale étude in situ des effets occasionnés sur l'Argile de Boom ainsi que sur différents matériaux potentiels pour le champ proche par la mise en dépôt d'un colis de déchets vitrifiés. Celui-ci a été simulé par un ensemble de sources de ^{60}Co destinées à créer un champ de rayonnement gamma représentatif d'un tel colis et par des résistances électriques, qui ont amené la température dans la formation argileuse à dépasser 100°C par endroits (fig. 3.40). (Cette expérience était très conservative puisque selon l'architecture de référence, le champ de rayonnement sera très fortement atténué par les barrières ouvragées – voir section 3.6.4). Les principaux résultats de l'expérience CERBERUS sont les suivants :

- *verres* La vitesse de corrosion des verres utilisés comme matrice semble diminuer dans un champ de rayonnement gamma.

- **matériaux d'emballage** Les aciers austénitiques, l'alliage de nickel, celui de titane et le titane pur ne montrent pas de signes de corrosion mais les échantillons d'acier au carbone, qui n'est toutefois plus envisagé comme matériau de suremballage ou d'emballage, présentent des signes de corrosion sévère.
- **béton** Le béton, qui serait utilisé comme matériau de revêtement, présente une zone de réaction superficielle enrichie en fer à l'interface échantillon-argile.
- **Argile de Boom** La composition minéralogique de l'Argile de Boom n'est pas significativement modifiée par le réchauffement et l'irradiation, le pH de la solution interstitielle reste approximativement neutre et son potentiel électrochimique reste réducteur. Le régime de pressions d'eau interstitielle répond rapidement au réchauffement et les cycles thermiques induisent une légère consolidation de l'argile.

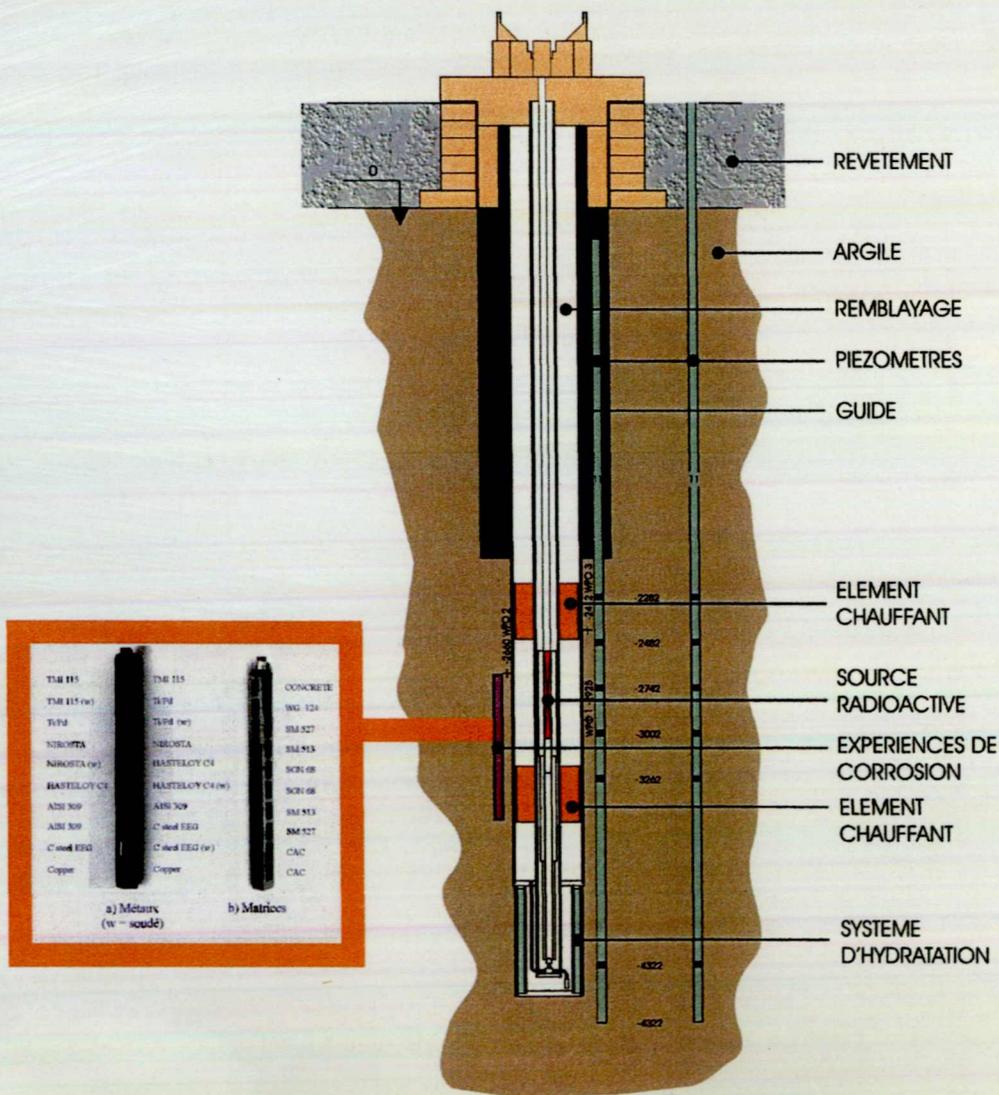


Figure 3.40 Schéma de l'expérience in situ CERBERUS qui combine un champ radiatif et un champ thermique.

3.6.1.2 Implications pour la conception des installations de dépôt

Les propriétés des matériaux prévus dans l'architecture de référence pour l'installation de dépôt final et l'interprétation des résultats expérimentaux disponibles ont permis d'établir une première série de critères quantitatifs définissant les températures maximales tolérables en divers endroits du système de dépôt et de son environnement.

Dans le *champ proche*, le réchauffement peut altérer les propriétés physicochimiques des déchets, du matériau de remblayage et des matériaux de structure des galeries de dépôt, ainsi qu'augmenter la vitesse de corrosion des matériaux d'emballage. Les températures maximales tolérables retenues sont les suivantes :

- pour les *déchets vitrifiés* : 400°C, soit, par sécurité, 100°C en deçà de la température au-delà de laquelle se produit une transition structurelle de la matrice et une altération de ses propriétés mécaniques ;
- pour les *assemblages de combustible usé* : 350°C, pour éviter une augmentation trop élevée de la pression générée par l'hélium présent dans les crayons de combustible ;
- pour le *matériau de remblayage* : 100°C, pour éviter toute altération physicochimique du matériau et, en particulier, éviter une perturbation significative du régime hydraulique local suite à l'augmentation de la pression interstitielle. C'est cette contrainte sur le matériau de remblayage qui est la plus déterminante pour le champ proche.

Dans le *champ lointain*, le réchauffement peut modifier les conditions géochimiques, géomécaniques et hydrogéologiques dans l'argile ainsi que sa minéralogie, et donc altérer ses propriétés de confinement et de rétention. Il peut aussi modifier le régime hydrogéologique dans les aquifères. Les températures maximales tolérables retenues sont les suivantes :

- pour l'*argile* : 100°C, qui est la température maximale observée durant l'expérience CERBERUS et pour laquelle aucune modification significative des propriétés de l'argile n'a pu être mise en évidence ;
- pour l'*aquifère du Néogène* : en l'absence de réglementation concernant les réchauffements maximaux acceptables pour le sous-sol, une augmentation maximale de 6°C en moyenne sur l'épaisseur de l'aquifère a été retenue ;
- Pour la *biosphère* : une augmentation maximale de 0.5°C a été retenue.

3.6.1.3 Impact thermique du dépôt

Les calculs thermiques effectués afin de quantifier les augmentations maximales de température dans l'ensemble du système de dépôt et de son environnement ont été effectués en considérant, pour les combustibles usés, trois taux de combustion. (Ces augmentations de température sont définies comme étant la différence entre la température induite localement par la présence des déchets et la température initiale de la formation argileuse, qui est d'environ 16°C.)

Pour les déchets vitrifiés et après 50 ans d'entreposage en surface, le réchauffement maximal à l'intérieur des colis est compris entre 160 et 200°C, selon la valeur de la conductivité thermique attribuée au matériau de remblayage, et est maximum après environ trois ans. Ce réchauffement chute au niveau des interfaces vides, c'est-à-dire entre le colis primaire et le suremballage, puis entre le suremballage et le tube de dépôt, pour n'être plus que d'environ 80°C sur la paroi interne du revêtement de la galerie (fig. 3.41).

Afin de respecter le critère relatif à l'aquifère surincombant, il est nécessaire d'espacer les galeries de dépôt pour déchets vitrifiés de 40 mètres. Ceci provoque une augmentation maximale de température à l'interface argile-aquifère d'environ 15°C. Pour les combustibles usés, la distance minimale à respecter entre galeries de dépôt varie de 80 à 110 mètres en fonction du taux de combustion.

A l'avenir, les travaux porteront d'abord sur la redéfinition de critères d'augmentation de température acceptable pour les différents composants du système de dépôt et de son environnement. Pour les barrières ouvragées, ces critères pourraient influencer les choix relatifs aux matériaux de suremballage et de remblayage. Dans ce dernier cas, les possibilités d'évacuation efficace de la chaleur par un matériau plus conducteur que dans l'architecture de référence devraient être étudiées. La définition des critères pour les aquifères et la biosphère devrait tenir compte des éventuelles prescriptions réglementaires en la matière ainsi que d'un examen des effets chimiques, minéralogiques et biologiques potentiellement induit par une augmentation de température. Le cas échéant, la géométrie des installations de dépôt (distance entre les galeries de dépôt et entre les déchets au sein de ces galeries) pourra être revue afin de réduire l'impact thermique sur les aquifères et la biosphère.

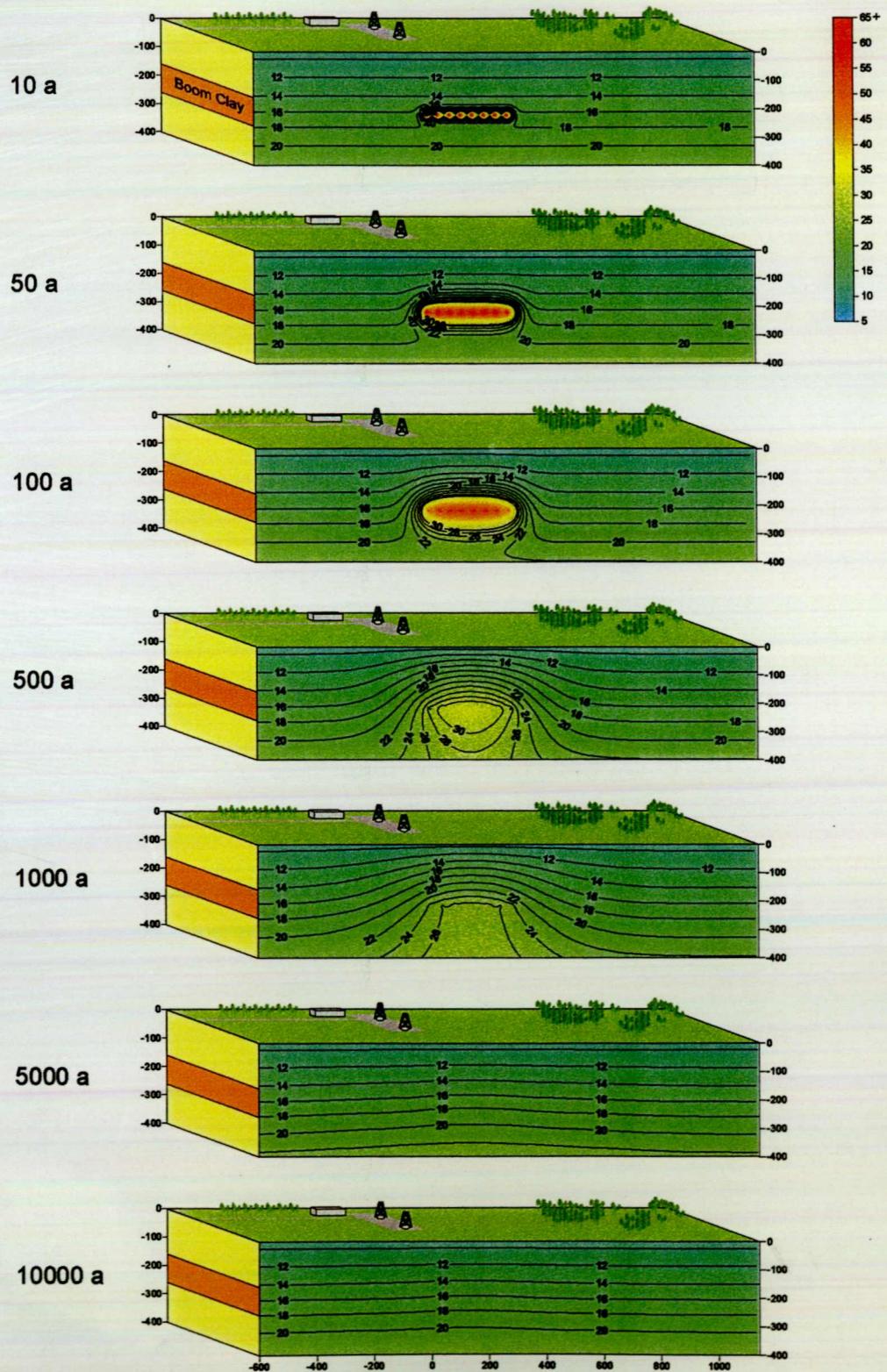


Figure 3.41 Champ thermique généré par un dépôt de déchets vitrifiés.

3.6.2 Les perturbations induites par l'excavation

3.6.2.1 Caractérisation et modélisation géomécanique

La construction de l'installation souterraine existante a été accompagnée de programmes intensifs d'auscultation des terrains en vue de l'optimisation des techniques de creusement et de revêtement, et de la compréhension du comportement géomécanique de l'argile lors de, et après, l'excavation. Alors qu'un bon degré de confiance a été atteint sur la qualité des mesures de déplacements et de pressions interstitielles, les mesures de pressions totales restent encore difficiles à réaliser. Ces programmes d'auscultation ont fait l'objet de nombreuses simulations réalisées par des équipes de modélisation de plusieurs pays. Différentes expériences in situ avec et sans charge thermique, dont certaines intègrent également l'étude des barrières artificielles et leurs interactions avec la formation-hôte, ont également permis le développement ou la vérification de codes de calcul (thermo)hydromécaniques.

La couche d'Argile de Boom sous le site de Mol-Dessel peut être assimilée à un milieu poreux saturé composé d'une phase solide (le squelette argileux) et d'une phase fluide. La mécanique des milieux poreux continus permet d'en décrire le comportement global à partir :

- du comportement de chaque phase (solide et liquide) prise séparément ;
- des relations de couplage entre les phases, c'est-à-dire des relations qui décrivent les effets des phases l'une sur l'autre.

Contrairement à l'idée initiale qui lui attribuait des qualités plutôt propres aux « sols », c'est-à-dire aux roches non consolidées, l'Argile de Boom se situe dans un domaine frontière entre les sols et les roches. A la profondeur des installations HADES, la pression lithostatique est de 4.5 MPa, alors que la pression hydrostatique est de 2.2 MPa. Cette dernière valeur a été récemment mesurée in situ dans le cadre du programme CLIPEX dans un piézomètre situé en dehors de la zone d'influence hydraulique du laboratoire souterrain. Elle correspond parfaitement avec la pression d'une colonne d'eau pour la profondeur des installations. On note une légère anisotropie entre les contraintes effectives verticale et horizontale. Les données reprises à la table 3.11 ci-dessous correspondent aux caractéristiques géomécaniques non drainées de l'Argile de Boom au niveau des installations existantes, en supposant que le massif présente un comportement élastoplastique parfait.

Table 3.11 Caractéristiques géomécaniques non drainées de l'Argile de Boom au niveau des installations souterraines existantes (223 m de profondeur), en supposant que l'argile présente un comportement élastoplastique parfait.

Module de Young, tangent à l'origine	E	200 à 400 MPa
Coefficient de Poisson	ν	0.4 à 0.45
Angle de friction	φ	4°
Cohésion	c	0.5 à 1 MPa
Limite de plasticité		23 à 29 %
Limite de liquidité		55 à 80 %
Limite de plasticité		32 à 51 %
Coefficient de poussée des terres au repos		0.9

Les instruments de mesure installés dans et autour du Test Drift permettent d'évaluer les réponses hydrauliques (piézomètres) et mécaniques (inclinomètres) du massif en cours de, et après, creusement. Les résultats ainsi obtenus ont permis de calibrer de nombreux modèles de comportement de l'Argile de Boom, ce qui a notamment mis en évidence l'importance des effets visqueux, non pris en compte par les modèles élastoplastiques classiques. Leurs résultats sous-estiment en effet les déplacements et les variations de pression interstitielle par rapport aux mesures in situ. D'autres modèles plus sophistiqués permettant une transition plus douce entre l'état élastique et plastique ont été utilisés. Les résultats obtenus avec ceux-ci sont plus proches des observations, sans pour autant pouvoir expliquer l'amplitude importante des chutes de pression interstitielle enregistrées lors du creusement du Test Drift. Il faut cependant noter que le creusement du Test Drift s'étant effectué de manière non mécanisée et à une cadence assez faible, les difficultés à appréhender les paramètres d'excavation, en particulier la surexcavation, sont importantes et empêchent un calage correct des modèles (superposition d'effets instantanés et différés dans le massif).

La prise en compte de la dépendance au temps du comportement de l'Argile de Boom a aussi fait l'objet de développements de manière à tenir compte des effets différés dus à la dissipation des pressions interstitielles et de ceux dus au squelette solide (viscosité). On a pu montrer que la prise en compte de ces effets engendre des variations de pressions interstitielles plus importantes. Cependant, l'identification des paramètres de ces modèles à partir des résultats des essais existants reste très difficile et demandera dans l'avenir un effort important.

C'est sur la base de ces constatations que le programme expérimental CLIPLEX a été défini. Ce dernier vise à étudier la réponse hydromécanique, c'est-à-dire les déplacements ainsi que les variations de pression totale et de pression interstitielle, de la formation pendant le creusement de la galerie de liaison (entre le deuxième puits et le Test Drift – voir fig.3.25) en instrumentant, notamment, à partir du Test Drift, la zone qui va être excavée. On disposera ainsi, pour la première fois dans l'Argile de Boom, de mesures directes des paramètres dans le massif à l'avant du front de taille, auxquelles s'ajoutera une mesure directe de la

convergence instantanée lors du creusement (à l'arrière de la trousse coupante du tunnelier – voir section 3.3.2.1). Le programme CLIPEX bénéficiera, par rapport aux auscultations précédentes, d'un meilleur contrôle des paramètres de creusement grâce à l'utilisation d'un tunnelier, et de la possibilité d'une dissociation des effets instantanés et différés. Au terme de ce programme, la comparaison des résultats expérimentaux avec les prédictions « à l'aveugle » des modèles hydromécanique devrait permettre d'affiner la compréhension et la modélisation du comportement de l'Argile de Boom et, en particulier, de sa réponse à une excavation.

A plus long terme, on approfondira l'étude du comportement différé, en particulier l'évolution dans le temps des contraintes exercées par le massif sur les revêtements et des déformations de ces derniers. D'un point de vue hydromécanique, la répartition des contraintes lors du croisement de deux galeries nécessitera des études tridimensionnelles. A ce sujet, l'information qui pourra être recueillie lors du creusement de la galerie nécessaire à l'installation de l'expérience PRACLAY sera très utile. Il est en outre évident que, pour la compréhension et la modélisation d'une telle expérience de démonstration, il faudra, en plus du comportement hydromécanique, tenir compte des couplages avec les champs thermiques et des effets liés au degré de saturation de la barrière ouvragée. Un effort important sera donc à fournir dans la maîtrise du comportement non saturé des matériaux mis en œuvre sur les gammes de températures attendues.

3.6.2.2 La zone perturbée par l'excavation

Comme indiqué à la section 3.3.2.1, des fractures sont apparues pendant le creusement des amorces des futures galeries, au bas du second puits, et ont provoqué le glissement de pans importants d'argile. A cet endroit, le massif est décomprimé par le creusement du puits. Outre les implications évidentes pour la sécurité minière, cette fracturation ouvre une série de questions relatives tant à la compréhension du comportement géomécanique de l'Argile de Boom qu'à son impact potentiel sur les propriétés de la formation-hôte et donc sur la sûreté à long terme du dépôt.

En matière de compréhension, l'hypothèse de continuité du milieu dans la zone perturbée pourrait devoir être reconsidérée de manière à expliquer les chutes de pression interstitielle importantes (10%) enregistrées lors du creusement et observées à partir des forages instrumentés du programme CLIPEX.

Dans des argiles plastiques, les modifications de conductivité hydraulique afférentes aux fissures ont tendances à se restaurer par un phénomène d'autocicatrisation. Ainsi, aucune variation significative de conductivité hydraulique n'a pu être notée autour du Test Drift une dizaine d'années après son creusement. En outre, un retour aux conditions de pression hydrostatique initiales est obtenu rapidement après l'emplacement dans le massif argileux des piézomètres destinés aux expériences de migration, d'injection de gaz, etc. (voir aussi section 3.6.3.2). Ces observations sont renforcées par la mesure de conductivité hydraulique à grande échelle faite autour du petit puits dans l'installation HADES (voir section 3.2.3.4) et qui donne des résultats comparables à la valeur de l'argile non perturbée. Un phénomène

d'autocicatrisation de l'argile prend donc place à relativement court terme après excavation. De manière à confirmer ces observations, plusieurs études ont été lancées afin de :

- estimer l'intensité et l'étendue de la zone perturbée par le creusement du deuxième puits et des amorces (forages carottés, mesures géophysiques) ;
- s'assurer de la restauration des conditions initiales de conductivité hydraulique dans la zone perturbée (installation de piézomètres) ;
- établir la genèse des fissures et fractures (discontinuités strictement induites par l'excavation ou réactivation de discontinuités naturelles préexistantes) ;
- interpréter les chutes de pression hydraulique observées lors de la construction du second puits ;
- évaluer les perturbations secondaires induites par la fracturation (oxydation de l'argile et, en particulier, de la pyrite) ;
- comprendre de façon plus fine les phénomènes contrôlant l'autocicatrisation de l'argile dans des conditions représentatives de celles rencontrées autour d'un dépôt profond (études théorique, expérimentale et de modélisation des processus de fracturation et de cicatrisation).

Enfin, il sera nécessaire d'évaluer l'impact de cette fissuration et de son évolution à long terme sur l'architecture de dépôt et la sûreté ainsi que, en particulier, de définir des critères de perturbation acceptable dans l'Argile de Boom lors du creusement, notamment en terme de paramètres de migration des radionucléides. Une reconsidération de l'épaisseur de la zone perturbée dans les évaluations de sûreté pourrait s'avérer nécessaire. Actuellement, la zone où les paramètres de migration pourraient avoir été perturbés sur le long terme par la construction et la présence du dépôt est estimée de manière conservatrice à une épaisseur de 5 m autour des galeries de dépôt.

3.6.3 Les perturbations induites par les gaz

L'évaluation des perturbations potentiellement induites par la production, l'accumulation et la migration de gaz au sein du système de dépôt a fait l'objet de très nombreux développements au cours de ces dix dernières années, et ce principalement dans le cadre de collaborations internationales. Les acquis du programme belge en la matière constituent une partie significative des connaissances actuellement disponibles. Ces développements concernent surtout les aspects expérimentaux et de modélisation des phénomènes entrant en ligne de compte, alors que les impacts sur la sûreté radiologique à long terme n'ont fait l'objet que d'un traitement relativement simplifié via l'évaluation d'un scénario d'évolution altérée (voir section 4.3.3).

3.6.3.1 La génération de gaz

Pour les déchets de catégorie C (déchets vitrifiés et combustibles usés), la corrosion anaérobie et la radiolyse sont les mécanismes de génération de gaz essentiels. Comme on le

verra plus tard (section 3.6.4), la radiolyse de l'Argile de Boom sera fortement limitée par la présence des barrières ouvragées et la rétention des radionucléides émetteurs alpha dans le matériau de remblayage.

Le taux de corrosion anaérobie généralisée des aciers inoxydables en présence d'Argile de Boom est très faible voire nul comme constaté tant expérimentalement que dans le cadre de l'exploitation quotidienne des installations souterraines HADES. De manière prudente, ce taux est fixé à $0.05 \mu\text{m.a}^{-1}$ pour les évaluations relatives à la génération de gaz. Un tel taux est d'autant plus conservatif que ce sont des phénomènes de corrosion localisée (corrosion par piqûre, sous tension, intergranulaire, etc.), peu générateurs de gaz, qui dominent pour de tels aciers.

Pour les déchets de catégorie B, outre le fait que les aciers en présence sont du type acier au carbone, nettement plus susceptible de subir une corrosion anaérobie généralisée, il faut considérer, comme mécanismes de génération de gaz complémentaires, la dégradation microbienne et la radiolyse des matières organiques. La production d'hydrogène par corrosion anaérobie des métaux est, ici aussi, le phénomène le plus pénalisant. Les expériences tant en laboratoire qu'in situ indiquent, qu'en présence d'Argile de Boom, l'acier au carbone subit une corrosion généralisée estimée conservativement à $1 \mu\text{m.a}^{-1}$. En première analyse, on a pu montrer expérimentalement que la production de gaz par dégradation microbienne pouvait être négligée, compte tenu des faibles volumes produits.

Le gaz produit par corrosion anaérobie des métaux est initialement de l'hydrogène mais on constate dans toutes les expériences une conversion rapide (quelques jours à quelques mois) de l'hydrogène (H_2) en méthane (CH_4) vraisemblablement suite à l'action de bactéries méthanogènes présentes dans l'Argile de Boom. Cette conversion réduit la quantité de gaz produite par quatre, mais, pour des raisons de conservatisme, on n'en tient pas compte dans les évaluations de sûreté.

Dans le programme futur, on s'intéressera à la disponibilité de l'eau dans le champ proche ainsi qu'à l'évolution dans le temps de sa géochimie de manière à évaluer la cinétique de la production de gaz. En outre, la poursuite des études relatives à la corrosion des métaux prévus comme composants de l'architecture des installations de dépôt devrait permettre de s'affranchir des taux de corrosion généralisée ultraconservatifs utilisés jusqu'à présent. Il sera nécessaire de préciser l'importance et les conséquences des phénomènes spécifiques de production de gaz pour les déchets bitumés comme l'activité microbienne, la radiolyse interne et, dans le cas particulier des déchets EUROBITUM, la génération d'azote à partir des nitrates en présence de bactéries dénitrifiantes.

3.6.3.2 Le transport du gaz

Tant la diffusion que l'advection de l'hydrogène et du méthane au travers de l'Argile de Boom ont été étudiées expérimentalement (in situ ainsi qu'en cellules de perméamètre, d'œdomètre, isostatiques et triaxiales) et au moyen de modèles.

Les possibilités de transport par diffusion (c'est-à-dire sous forme de gaz dissous dans l'eau interstitielle) dans la formation-hôte sont très limitées, surtout pour l'hydrogène. (Le coefficient de diffusion apparent de l'hydrogène est proche de celui de l'eau tritiée.) La conversion continue de l'hydrogène en méthane rend l'interprétation des données expérimentales très délicate. Dû à sa plus grande solubilité, le méthane présente un coefficient de diffusion plus élevé qui reste cependant à confirmer.

La faible capacité de diffusion des gaz produits implique un risque d'accumulation sous forme d'une phase gazeuse et donc d'une surpression dans le champ proche. Une telle surpression peut conduire, d'une part, à l'expulsion de l'eau interstitielle de l'Argile de Boom et, d'autre part, à la création de voies de migration préférentielles dans la formation-hôte (fracturation). Comme seule une faible fraction de l'eau interstitielle de l'Argile de Boom est mobile, c'est principalement le second mécanisme advectif qu'il faut considérer. Les expériences in situ et en laboratoire ont montré le fort couplage entre la distribution des contraintes géomécaniques dans le massif argileux et la pression au delà de laquelle ce dernier se fracturerait sous la pression des gaz. Ainsi, des voies de migration préférentielles seraient créées lorsque la pression des gaz dépasse la contrainte totale minimale ; le plan de fracturation se situe dans une direction perpendiculaire à cette contrainte. Le degré de désaturation de l'argile lors de la fracturation est limité à quelques pourcents de la porosité totale, ce qui implique que le mouvement d'eau interstitielle qui en résulte est très faible. Les fractures ainsi créées sont très perméables aux gaz, de sorte que la surpression initiale se réduit rapidement. Les expériences mettent clairement en évidence un phénomène d'autocicatrisation des voies préférentielles dès l'arrêt de l'injection de gaz ou la diminution de la surpression. Le gaz migre donc par à-coups en fonction des cycles d'ouverture et de fermeture des voies préférentielles commandés par les équilibres entre la pression des gaz et la distribution des contraintes effectives.

Un test de migration avec de l'eau tritiée a montré que l'argile a, après fracturation et autocicatrisation, recouvré ses propriétés initiales. Pour cette expérience in situ, la voie préférentielle créée par fracturation a été maintenue ouverte pendant un an avant arrêt de l'injection de gaz et injection de l'eau tritiée.

De manière à mieux comprendre les phénomènes impliqués dans le transport des gaz au sein de l'Argile de Boom à l'échelle expérimentale, divers modèles conceptuels ont été élaborés. La variation discontinue de la conductivité de l'argile par rapport au gaz (création de voies préférentielles) rend impossible l'utilisation de modèles classiques basés sur les lois de transport biphasique simples. La poursuite de l'effort entrepris en matière de modélisation du couplage entre les conditions géomécaniques, qui conditionnent la propagation des gaz, la fracturation et l'évolution de cette dernière est nécessaire au vu des premiers résultats encourageants obtenus. Dans le futur, il faudra aussi s'intéresser à l'extrapolation temporelle et spatiale du ou des modèles conceptuels, ainsi qu'à leur simplification en vue de leur incorporation dans les évaluations de sûreté à long terme. Une initiative en ce sens a récemment été prise au niveau européen.

En outre, il sera intéressant d'analyser l'influence de la zone perturbée par l'excavation sur la génération et l'évolution des fractures potentiellement induites par les surpressions gazeuses, ainsi que de déterminer les propriétés des voies préférentielles de migration.

La compréhension actuelle du transport des gaz au sein de l'Argile de Boom peut se synthétiser comme suit :

- si la génération de gaz est inférieure à la capacité de diffusion des gaz par l'argile, seul du gaz dissous est présent ;
- si la génération de gaz est supérieure à la capacité de diffusion, la pression partielle du gaz augmentera jusqu'à ce qu'elle excède la pression interstitielle locale (2.2 MPa) ; à ce moment, une phase gazeuse est créée. Les bulles de gaz ainsi formées déplacent alors l'eau interstitielle de l'argile et ce, de façon très limitée (flux biphase) ;
- dès que la pression des gaz dépasse localement la pression lithostatique (4.5 MPa), une fracturation prend place et une voie préférentielle de migration est créée.

3.6.3.3 Les impacts sur l'Argile de Boom

Pour l'architecture de référence pour déchets vitrifiés, le taux de production de gaz attendu par corrosion anaérobie généralisée des aciers de l'emballage primaire, du suremballage et du tube de dépôt est suffisamment faible pour que l'hydrogène produite et transformée en méthane puisse être éliminée par diffusion à travers l'Argile de Boom. Si cette transformation n'est pas effective, une phase gazeuse pourrait se former mais les pressions atteintes devraient rester en dessous de celle requise pour une fracturation de la formation-hôte.

Pour les déchets de catégorie B, tant la génération d'hydrogène que celle de méthane conduira à la formation d'une phase gazeuse ; en cas d'absence de conversion de l'hydrogène en méthane, la création de voies préférentielles par fracturation est probable.

La faiblesse des écoulements biphases et la capacité d'autocicatrisation – vis-à-vis des propriétés de migration des radionucléides – des voies préférentielles potentiellement générées par les surpressions gazeuses, devraient limiter l'impact général des gaz sur la formation-hôte et ce, malgré sa faible capacité de diffusion des gaz.

3.6.4 Les perturbations induites par les rayonnements

Le rayonnement gamma produit par les déchets fortement radioactifs (catégorie C) sera en grande partie absorbé par les matériaux présents dans les barrières ouvragées : seule une fraction négligeable atteindra l'Argile de Boom. Les niveaux d'irradiation à l'interface entre le revêtement des galeries et l'Argile de Boom seront a priori trop faibles pour modifier significativement la géochimie et la minéralogie du milieu.

Néanmoins, les effets sur l'Argile de Boom d'un champ de rayonnement gamma intense, combiné à un champ thermique, ont été étudiés au cours de l'expérience in situ CERBERUS.

Pour cette dernière, des sources de ^{60}Co , d'activité totale équivalente à celle d'un colis de déchet vitrifié, ont été installées in situ au voisinage immédiat de l'argile durant une période de 5 ans (voir section 3.6.1). Pour des débits de dose extrêmement pénalisants au regard des conditions réelles (plusieurs ordres de grandeur supérieurs), cette expérience a montré que l'irradiation gamma n'a pas d'effet significatif ni sur la minéralogie et la géochimie de l'Argile de Boom ni sur la migration de l'américium (sensible à la complexation avec la matière organique) et du technétium (sensible au potentiel rédox). On note cependant un processus de coalescence de la matière organique, la formation d'ions oxalate, sulfate et thiosulfate. Comme la corrosion des métaux pourrait être négativement affectée par la présence de thiosulfates, l'influence de ces derniers a été étudiée (voir section 3.4.2.1).

L'irradiation alpha sera insignifiante dans le champ lointain et ce pour plusieurs raisons :

- les actinides présentent des solubilités très faibles ce qui limite leur flux à l'interface entre les barrières ouvragées et l'argile ;
- l'activité des émetteurs alpha de courte demi-vie, caractérisés par une activité spécifique élevée, aura significativement décru au niveau du champ proche suite à la sorption sur les barrières ouvragées et leurs produits de dégradation.

On peut donc conclure que la perturbation d'origine radiochimique sera négligeable pour la formation-hôte.

3.6.5 Les perturbations géochimiques

Le maintien à long terme des conditions géochimiques favorables de l'Argile de Boom, notamment en matière de rétention des radionucléides, est un des sujets importants pour l'évaluation des performances de la formation-hôte. Les phénomènes concernés sont principalement les suivants :

- l'oxydation de la pyrite et de la matière organique par l'oxygène de l'air des galeries ;
- la migration de fronts chimiques générés par le champ proche (panache alcalin résultant de l'utilisation de ciment ou de béton, lixiviation du nitrate de sodium) ;
- l'impact sur la solubilité et la sorption des radionucléides des produits de dégradation des composés organiques et en particulier de la cellulose.

A ces perturbations, on peut ajouter la migration des éléments potentiellement chimiotoxiques.

3.6.5.1 Migration des toxiques chimiques

Outre le risque radiologique, les déchets radioactifs sont susceptibles de présenter un danger de toxicité chimique pour l'homme et pour l'environnement. Cet aspect a, depuis la publication du rapport SAFIR, fait l'objet d'une analyse préliminaire, destinée à évaluer l'impact sur l'environnement des composés toxiques présents dans les déchets des catégories B et C en comparant les concentrations maximales en éléments toxiques dans les aquifères aux normes applicables à l'eau potable. Cette étude achevée en 1995 ne considérait essentiellement que la migration des métaux (éléments chimiques purs), dans le scénario d'évolution normale du

dépôt (voir section 4.2.2.1). Elle montre que, sous réserve des hypothèses admises, la toxicité chimique des déchets du groupe géologique ne porte pas préjudice à la sûreté du dépôt, ce qui n'est pas étonnant dans la mesure où la plupart des métaux sont présents en solution sous une forme cationique et que les espèces chargées positivement sont fortement sorbées sur l'Argile de Boom. Concrètement, la méthodologie suivie pour évaluer la toxicité chimique d'un dépôt consistait à :

- caractériser le terme source, c'est-à-dire faire l'inventaire quantitatif des éléments métalliques présents dans les déchets susceptibles, à terme, d'aboutir dans les aquifères ;
- sélectionner, dans cet inventaire, les éléments à prendre en compte pour l'étude de la migration dans l'Argile de Boom ;
- étudier la migration de ces éléments dans l'Argile de Boom.

La sélection, parmi les 54 éléments identifiés, des éléments à prendre en compte pour les études de migration s'est faite sur la base de trois types de critères (la *comparaison de la toxicité chimique et de la toxicité radiologique*, la *similitude des propriétés chimiques des lanthanides* et la *solubilité*) et a permis de les réduire à 24 : B, Cr, Mn, Co, Ni, Zn, Ge, As, Br, Rb, Sr, Y, Mo, Tc, Cd, In, Sb, Cs, Ba, Sm, W, Hg, Pb et U.

Les évaluations de migration ont été réalisées dans une première phase de manière conservatrice, en considérant un transport diffusif sans limitation de solubilité (les éléments sont donc entièrement solubles dans l'eau interstitielle de l'Argile de Boom). Dans une seconde phase, qui ne portait que sur les éléments dont les concentrations à l'interface argile-aquifère étaient supérieures au milligramme par litre, on a appliqué de limites de solubilité, lorsque celles-ci étaient connues.

La comparaison des concentrations à l'interface argile-aquifère avec les normes applicables en matière d'eau potable en Flandres (législation de 1992, conforme aux recommandations européennes) suggère que la toxicité chimique des déchets mis en dépôt dans l'Argile de Boom n'est pas un facteur limitatif de la sûreté. Les quatre éléments dont les concentrations maximales calculées dans les aquifères se rapprochent le plus des teneurs maximales admissibles et qui possèdent donc le potentiel de toxicité chimique le plus élevé, à savoir le bore, le nickel, le molybdène et l'uranium, ont en effet des concentrations qui sont systématiquement inférieures au minimum d'un facteur 100 par rapport aux normes applicables. (Pour les métaux ne figurant pas dans cette réglementation, on a utilisé dans la mesure du possible les normes relatives à des éléments dotés de propriétés chimiques proches. Quant au samarium et à l'uranium, pour lesquels n'existaient alors aucunes normes, leurs concentrations maximales dans les aquifères $1,7 \cdot 10^{-9} \text{ g.l}^{-1}$ et $2,5 \cdot 10^{-8} \text{ g.l}^{-1}$ respectivement sont significativement inférieures à la norme la plus sévère, en l'occurrence celle qui se rapporte au mercure, qui est de 10^{-6} g.l^{-1}).

Compte tenu toutefois des quantités de métaux associées aux déchets, il n'est pas exclu que les sites de sorption de l'argile soient saturés dans l'environnement immédiat du dépôt, ce qui

impliquerait une réduction des facteurs de retard et donc une augmentation des concentrations maximales dans les aquifères.

Une réévaluation de la chimiotoxicité des déchets à mettre en dépôt profond devra être effectuée dans la suite du programme notamment sur base d'une confirmation des inventaires en présence. Il faudra en outre analyser les potentialités et les conséquences d'une compétition entre sorption des radionucléides et sorption des éléments métalliques dans le champ proche et l'Argile de Boom.

3.6.5.2 Migration des fronts chimiques

Le phénomène d'oxydation au contact de l'air de la pyrite présente à raison de 1% à 5% dans l'Argile de Boom comporte trois étapes : oxydation de la pyrite proprement dite avec libération de protons (acidification), dissolution de la calcite présente dans l'argile (neutralisation) et échange des ions calcium par les ions sodium des minéraux argileux. En conséquence, l'eau interstitielle de l'Argile de Boom devient de type sulfatée sodique. L'oxydation de l'argile engendre également, outre des sulfates, des ions thiosulfates dont l'importance en matière de corrosion par piqûre des barrières métalliques a été démontrée. Il convient toutefois de souligner le caractère très localisé de l'oxydation de la pyrite et qu'aucun fluide acide n'a jamais été recueilli dans le laboratoire souterrain au niveau des divers piézomètres en opération.

Il sera nécessaire de quantifier le phénomène d'oxydation de l'argile au contact de l'air et la vitesse de progression du front d'oxydation, de manière à définir les périodes maximales admises pour les différentes phases d'exploitation des installations de dépôt. Etant donné, d'une part qu'un revêtement sera rapidement mis en place lors du creusement des galeries et d'autre part que le transport de l'oxygène dans l'argile sera contrôlé par la diffusion, on s'attend a priori à un phénomène d'oxydation limité. Une étude a récemment débuté concernant l'oxydation de l'argile le long des fissures induites par l'excavation des installations souterraines.

Un front alcalin pourrait être généré par la dégradation des bétons et ciments utilisés par exemple pour le revêtement des galeries, comme matrice des déchets ou comme matériaux de remblayage. Un tel panache alcalin pourrait engendrer des modifications de la géochimie et de la minéralogie de l'argile (dissolution/précipitation des minéraux, échanges cationiques, etc.) et en conséquence de ses propriétés de migration ainsi que de la spéciation des radionucléides.

Une première évaluation fondée sur la réactivité des minéraux constitutifs de l'argile (hydrolyse des alumino-silicates en milieu alcalin) indique que l'épaisseur de la formation-hôte susceptible d'être perturbée par un front alcalin en provenance de la dégradation du revêtement des galeries de dépôt pour déchets vitrifiés devrait être de l'ordre de quelques dizaines de centimètres. En complément de ces réactions, l'argile contribuera à la neutralisation de l'alcalinité du béton par l'apport permanent de carbonates. Pour les galeries de déchets de catégorie B remblayées à l'aide d'un ciment hydraulique, l'étendue de la perturbation alcaline dans l'argile devrait être plus importante. Elle n'a cependant pas encore

été quantifiée à ce jour, pas plus que ses conséquences éventuelles sur le transport des radionucléides. Ces sujets font l'objet de divers programmes de recherche récemment débutés. Si cela s'avérait nécessaire, l'utilisation d'un ciment à faible alcalinité pourrait être envisagée pour les revêtements et le remblayage.

Récemment a également été entamée une étude portant sur l'influence de la migration d'un front de nitrate de sodium dont environ 750 tonnes sont présentes dans les déchets bitumés en provenance d'EUROBITUM.

Des composés organiques, et en particulier des dérivés cellulosiques, sont présents dans certains flux de déchets. Vu l'impact potentiel des produits de dégradation de la cellulose en milieu anaérobie et alcalin sur la solubilité et la sorption des radionucléides, la priorité a été accordée à cette tâche. Les résultats partiels disponibles indiquent que les produits de dégradation de la cellulose n'ont que peu d'influence sur la spéciation et la solubilité du plutonium et de l'américium dans l'argile.

Groupe de référence Groupe comprenant des individus dont l'exposition à une source est relativement uniforme et représentative de celle des individus qui, parmi la population, sont plus particulièrement exposés à cette source.

3.7 La modélisation de la biosphère

La modélisation de la biosphère vise à permettre l'évaluation de l'impact radiologique du relâchement de radionucléides dans la biosphère par un système de dépôt. L'impact radiologique individuel estimé correspond à la dose efficace annuelle à un individu du groupe de référence (voir aussi sections 2.1 et 4.3.1.1).

Depuis la publication du rapport SAFIR, une vaste collaboration internationale (programmes BIOMOVs et BIOMASS de l'AIEA) a permis de mettre au point une méthodologie systématique de développement de modèles conceptuels et mathématiques de la biosphère. Cette méthodologie a été appliquée au contexte local de la zone nucléaire de Mol-Dessel. Concrètement, le modèle de la biosphère part du scénario d'évolution normale, dans lequel la biosphère est supposée invariable. Il est utilisé dans les évaluations de sûreté afin d'évaluer les doses à un individu du groupe de référence en partant des flux et des concentrations en radionucléides dans les aquifères. Etant donné les longues périodes de relâchement des radionucléides, il suppose que les rapports des concentrations dans les différents compartiments de la biosphère restent constants ou peuvent être considérés comme une moyenne dans le temps pour les paramètres qui fluctuent. C'est donc un modèle à l'équilibre.

Concrètement, les radionucléides qui finiront par être relâchés par le système de dépôt seront transportés par les eaux souterraines dans l'aquifère, jusqu'à ce qu'ils aboutissent dans différents types de *récepteurs* qui leur ouvriront la porte de la biosphère (fig. 3.42). Pour la zone nucléaire de Mol-Dessel, les études considèrent que les radionucléides peuvent pénétrer dans la biosphère par les trois types de récepteur suivants :

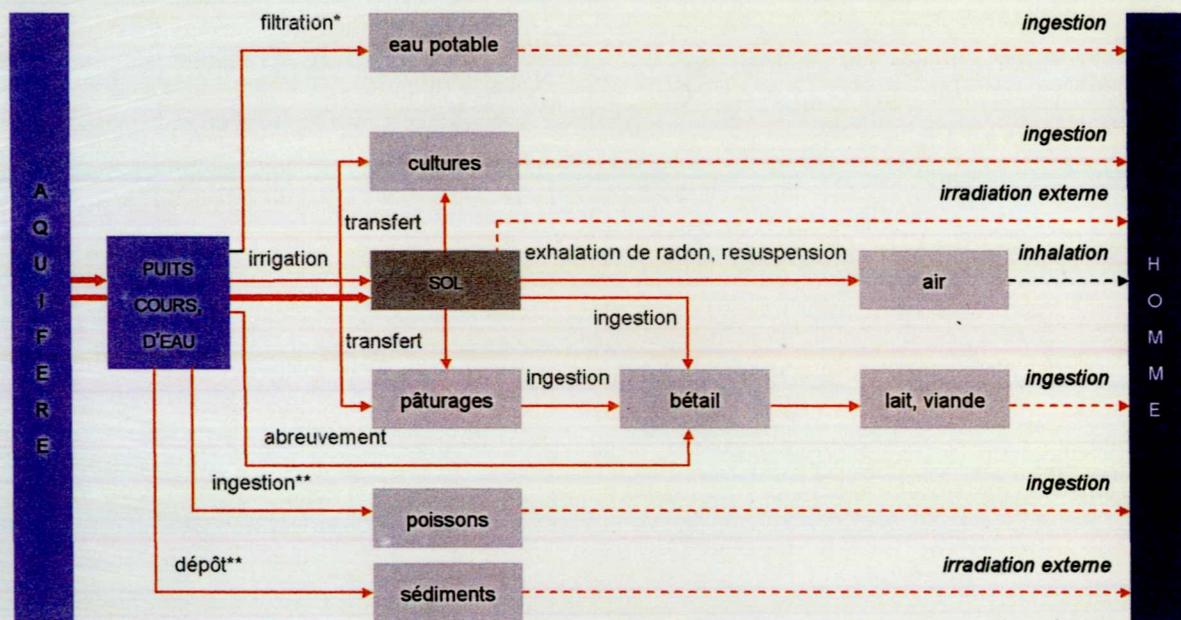
- les *puits* qui auraient été creusés dans l'aquifère à la périphérie de l'installation de dépôt, en aval de celle-ci, à l'endroit des concentrations maximales ;
- les *cours d'eau*, qui pourront disperser la contamination ;
- la couche du *sol* dans laquelle pénètrent les racines des plantes.

Une fois dans les récepteurs, les radionucléides continueront à se disperser dans la biosphère par *transfert* à d'autres supports, soit naturellement, soit à la suite d'interventions humaines, et ce sont ces supports qui formeront alors également les sources d'exposition pour l'homme. Les principaux modes de transfert sont les suivants :

- L'eau contaminée des puits peut servir à la préparation d'eau potable, à l'irrigation des cultures et des pâturages et à l'abreuvement du bétail.
- L'eau contaminée des cours d'eau peut, pour autant qu'ils soient suffisamment grands, être ingérée par les poissons ou contaminer les sédiments déposés sur leur lit.
- Enfin, les radionucléides contenus dans les sols contaminés, que ce soit directement par l'eau du sous-sol ou suite à l'irrigation par de l'eau contaminée, peuvent être ingérés par le bétail ou être absorbés par les racines des plantes qui y poussent ou y sont cultivées et, ensuite, ingérés par le bétail ou par l'homme.

Enfin, les principales *voies d'exposition* radiologique dues à l'utilisation des récepteurs et des supports par l'homme, ou même à leur simple présence, sont

- l'*ingestion* d'eau potable et d'aliments contaminés (fruits, légumes, lait, viande, poisson) ;
- l'*inhalation* de poussières en suspension dans l'air au-dessus des champs contaminés et de radon exhalé par le sol et provenant de déchets contaminés au radium ;
- le *rayonnement externe* du sol à des individus qui se trouveraient sur les champs contaminés ou sur les berges des rivières dont les sédiments sont contaminés.



* sauf pour les petits cours d'eau

** sauf pour les petits cours d'eau et pour les puits

Figure 3.42 Modèle de la biosphère. Les différentes voies d'exposition de l'homme aux rayonnements ionisants pour la zone nucléaire de Mol-Dessel suite au transfert des radionucléides de l'aquifère aux récepteurs de la biosphère puis, de là, aux autres supports de la biosphère.

Les valeurs des concentrations des radionucléides dans les compartiments de la biosphère permettent alors de calculer l'exposition résultante et la dose individuelle.

L'utilisation des facteurs de transfert entre les différents compartiments de la biosphère (par exemple du sol au pâturage, ou de la vache au lait), permet de calculer les concentrations en radionucléides dans les supports d'exposition en fonction des concentrations dans les récepteurs, autrement dit de relier entre elles les concentrations dans les différents compartiments.

La détermination des doses individuelles annuelles attendues suppose ensuite que toutes les voies d'exposition potentielles qui peuvent contribuer de manière importante à l'exposition d'individus du groupe de référence sont prises en considération. Elle se fait donc à partir des concentrations en radionucléides dans les compartiments de la biosphère qui sont pertinents.

Les doses aux individus du groupe de référence peuvent être subdivisés en trois grandes catégories. Leur calcul utilise les coefficients de dose recommandés par la CIPR.

- La *dose par ingestion* est le produit des concentrations dans l'eau potable et dans l'alimentation par les quantités consommées annuellement et par les coefficients de dose pour l'ingestion.
- La *dose par inhalation* est uniquement considérée pour des agriculteurs dans leur champ. Elle est le produit des concentrations dans l'air par les quantités d'air contaminé inhalées annuellement et par les coefficients de dose pour l'inhalation.
- La *dose par irradiation externe* est considérée pour des agriculteurs dans leur champ et pour des pêcheurs sur le bord des rivières. Elle est le produit des concentrations dans le sol ou dans les sédiments par les durées d'exposition annuelles et par les coefficients de débit de dose pour l'irradiation externe.

Les résultats finaux des calculs sont exprimés en termes de facteurs de conversion de dose, autrement dit la dose maximale annuelle pour une concentration donnée dans les puits, les cours d'eau ou les sols.

3.8 Les Argiles Yprésiennes comme formation-hôte alternative

3.8.1 Introduction

Comme mentionné à la section 3.2.1, l'ONDRAF a, à la demande de la Commission d'Evaluation SAFIR (1990), entrepris l'étude d'une formation-hôte alternative de manière à disposer d'une solution de rechange au cas où l'on devrait mettre en évidence un vice rédhibitoire pour l'Argile de Boom, c'est-à-dire un vice qui empêcherait cette dernière d'assurer les fonctions de sûreté à long terme qui lui sont attribuées sans qu'il soit possible d'y remédier par l'intermédiaire des barrières ouvragées.

Comme c'est le cas pour l'Argile de Boom, le programme de recherche et développement relatif aux Argiles Yprésiennes est de type méthodologique et considère un site de référence – la zone nucléaire de Doel – sans pour autant préjuger de l'endroit où sera éventuellement mis en œuvre la solution proposée de dépôt final. L'objectif de ce programme est d'évaluer les potentialités des Argiles Yprésiennes comme formation-hôte tant du point de vue de la sûreté que de la faisabilité. Il concerne principalement les sciences de la terre et l'étude de la migration mais ne s'est, jusqu'à présent, pas penché sur les aspects relatifs à l'architecture des installations de dépôt.

Les acquis de l'ONDRAF en matière d'Argiles Yprésiennes résultent d'une part d'un inventaire des connaissances sur les formations argileuses du Groupe d'Ypres et, d'autre part, sur les résultats obtenus à partir d'une série de forages réalisés à Doel afin de :

- obtenir des échantillons non perturbés d'Argiles Yprésiennes et des sables encaissants en vue d'une caractérisation générale et d'essais de migration ;
- effectuer un programme important de mesures diagraphiques de haute résolution ;
- réaliser des essais hydrauliques par injection ;
- installer des piézomètres.

En matière de lithologie et de géométrie, c'est la Formation de Courtrai qui semblait la plus favorable parmi le Groupe d'Ypres ; c'est donc sur cette dernière que se sont concentrées les recherches. D'un point de vue terminologie, il faut noter que ce qui est appelé « Argiles Yprésiennes » dans le cadre du programme de l'ONDRAF regroupe en fait les couches les plus argileuses du Groupe d'Ypres, soit les Membres de Saint-Maur, Moen et Aalbeke de la Formation de Courtrai ainsi que le Membre de Kortemark, qui appartient à la Formation de Tielt.

L'interprétation des résultats obtenus au cours de la campagne de forages est encore en cours de sorte qu'il n'a pas encore été possible d'exploiter au mieux les données acquises et, a fortiori, de tirer des conclusions précises sur les potentialités des Argiles Yprésiennes comme formation-hôte.

3.8.2 Le cadre géographique et géologique

La zone nucléaire de Doel se situe au nord de la ville d'Anvers sur la rive droite de l'Escaut. Le paysage est principalement composé de polders de l'Escaut (voir fig. 3.xx). La topographie est très plate, aucun point ne dépassant 10 m au dessus du niveau de la mer. La région fait partie de la Vallée Flamande, un important système de vallées du Pléistocène comblé par des sédiments hétérogènes (sables fluviatiles, tourbes). L'ensemble a été recouvert d'une couche de sables éoliens dépassant rarement 5 mètres d'épaisseur. Cette région fait entièrement partie de l'aire de drainage de l'Escaut et se caractérise par la présence d'un réseau dense de fossés et de canaux permettant un drainage artificiel.

Litho-stratigraphie

Le terme Argiles Yprésiennes se réfère aux argiles qui se sont déposées au cours de la période de l'Yprésien, qui fait partie de l'Eocène, et s'étend entre 54 et 49 millions d'années. En termes litho-stratigraphiques, les Argiles Yprésiennes appartiennent au Groupe d'Ypres et en particulier à la Formation de Courtrai qui est divisée en quatre membres qui sont, du plus âgé au plus jeune : Mont-Héribu, Saint-Maur, Moen et Aalbeke. Le Membre du Mont-Héribu se compose d'alternances d'argiles silteuses et de sables très fins. Les argiles de Saint-Maur ont été déposées par dessus. Le Membre de Moen est un complexe hétérogène d'argiles, de silts et de sables très fins contenant diverses couches coquillères et glauconitiques. Ce complexe est surplombé par le Membre d'Aalbeke principalement argileux. Suite à l'absence quasi totale de sable, le Membre d'Aalbeke constitue le dépôt d'argile marine le plus pur du Tertiaire belge. Le Membre de Kortemark, qui appartient en fait à la Formation de Tielt, qui surplombe le Membre d'Aalbeke est lui aussi argileux et est composé d'argiles compactes riches en silt.

La Formation de Courtrai affleure dans la région du même nom et s'épaissit en direction du nord et de l'ouest (fig. 3.43). En raison d'une faible pente orientée au nord, le sommet de la formation se situe, dans la partie septentrionale de la Province d'Anvers, à des profondeurs dépassants 400 mètres. Le Membre le plus homogène de la Formation de Courtrai est celui de Saint-Maur. Cette couche argileuse est la seule à avoir été déposée dans l'entièreté du bassin de sédimentation ; l'occurrence des autres membres est fonction de la localisation dans le bassin.

Contexte tectonique

La zone nucléaire de Doel appartient à une région dont le sous-sol est dominé par la présence du Massif du Brabant d'âge Paléozoïque. En contraste avec le Bassin de la Campine, les roches du Crétacé reposent directement sur le socle Paléozoïque.

L'ensemble du nord-ouest de la Belgique est en subsidence à un taux d'environ 0.5 mm par an par rapport au point de référence (Uccle). Une subsidence plus importante peut localement prendre place suite à des pompages intensifs d'eau souterraine.

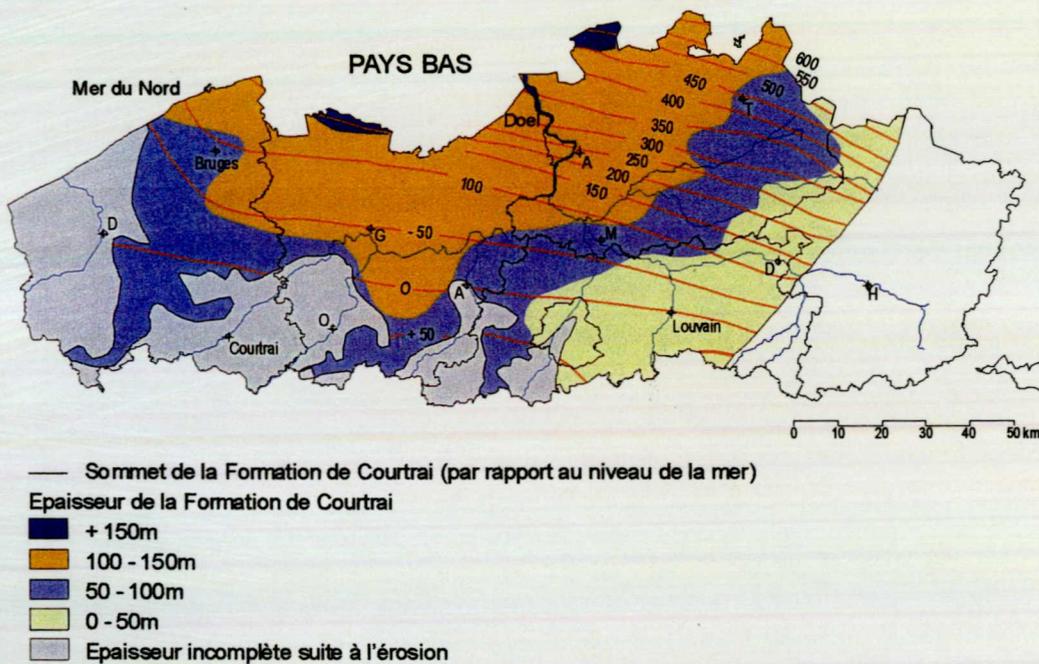


Figure 3.43 Epaisseur et profondeur du sommet de la Formation de Courtrai.

Le Massif du Brabant est compartimenté par une série de failles d'orientation nord-est et ouest-nord-ouest qui ne se prolongent habituellement pas au sein des terrains du Crétacé ou du Tertiaire. Ce massif est tectoniquement actif comme l'a par exemple montré le séisme d'Oudenaerde de 1938 qui a atteint une intensité VII aux alentours de l'épicentre. Sur une carte des risques sismiques, la région se situe en zone d'intensité comprise entre VI et V.

Des reconnaissances par sismique réflexion réalisées en Mer du Nord ont mis en évidence de nombreuses déformations tectoniques au sein même de la Formation de Courtrai. On retrouve ces déformations dans quelques argilières. Ces failles trouvent probablement leur origine dans des phénomènes d'expulsion d'eau lors de l'enfouissement progressif de la couche. L'impact de ces failles sur les écoulements actuels d'eau souterraine est inconnu.

Hydrogéologie

On trouve des aquifères au-dessus et en dessous de la Formation de Courtrai. Les écoulements d'eau souterraine au sein de ces aquifères sont fortement influencés par les

pompages intensifs d'eau, de sorte que le mouvement général résultant est descendant. En l'absence de pompage, ce dernier serait ascendant. Ceci démontre la sensibilité du système hydrogéologique aux perturbations d'origine anthropogène mais aussi à celles potentiellement induites par des changements climatiques.

3.8.3 Les caractéristiques des Argiles Yprésiennes à Doel

Les résultats préliminaires reportés ci-dessous proviennent de l'interprétation des mesures diagraphiques des forages de Doel, des essais hydrauliques réalisés tant in situ qu'en laboratoire et des tests de laboratoire effectués sur les sections carottées. Il est important de noter que les difficultés rencontrées lors du forage n'ont pas permis l'obtention de conditions de parois et de stabilité optimale pour les mesures diagraphiques.

A l'aplomb de la zone nucléaire de Doel, la partie la plus argileuse de la Formation de Courtrai, au sein on inclut le Membre de Kortemark qui appartient en fait à la Formation de Tielt, représente une épaisseur totale continue de 114 mètres.

Minéralogie

La teneur en carbonates de la Formation de Courtrai est généralement inférieure à 2%, à l'exception de la partie centrale du Membre de Moen où cette teneur peut atteindre 5%. La base du Membre de Kortemark, est aussi plus riche en calcaire. La teneur en matière organique est faible et distribuée de manière homogène. La fraction sableuse consiste principalement en du quartz, des feldspaths, des minéraux opaques et des fragments fossilifères de petite taille. La fraction silteuse montre, pour sa partie non phyllosilicatée, une prédominance de feldspaths ainsi que du quartz et des carbonates. La minéralogie des argiles de la fraction silteuse est dominée par l'illite et la kaolinite (la base du Membre de Saint-Maur contient jusqu'à 30% de kaolinite).

Les minéraux argileux gonflants (smectite) constituent plus de la moitié de la fraction argileuse de la Formation de Courtrai ; l'illite étant l'autre minéral dominant. Le Membre de Saint-Maur se caractérise par plus de 75% de minéraux argileux et un contenu important en kaolinite. La teneur du smectite augmente dans le Membre de Moen aux dépens de la kaolinite. L'argile d'Aalbeke se compose presque exclusivement (89%) de minéraux argileux.

Propriétés physiques et géomécaniques

La teneur en eau (en pourcentage du poids sec) diminue à mesure que la profondeur augmente : elle varie entre 34 et 16%, avec une valeur moyenne de 27%. La porosité totale varie, dans le même sens, entre 48 et 32%.

Les propriétés thermiques d'échantillons représentatifs des différentes unités stratigraphiques du Groupe d'Ypres ont été déterminées. Pour les échantillons humides, la conductivité thermique est faible et varie entre 0.7 et 1.1 W.m⁻¹.K⁻¹.

Le Membre d'Aalbeke montre un indice de plasticité et une pression de gonflement très élevés (150% et 1.72 MPa respectivement) comme on pouvait s'y attendre suite à sa forte teneur en argile. Les difficultés rencontrées dans la stabilisation des parois de forage laissent présager d'une faible résistance mécanique de ces argiles et donc, potentiellement, de difficultés d'excavation des installations souterraines.

Conductivité hydraulique

Les Argiles Yprésiennes se caractérisent par une conductivité hydraulique comparable aux valeurs mesurées localement pour l'Argile de Boom (entre 10^{-11} m.s⁻¹ et 10^{-12} m.s⁻¹). Les Membres de Saint-Maur et d'Aalbeke présentent les valeurs les plus basses.

Les essais in situ par injection donnent des valeurs de conductivité hydraulique systématiquement plus élevées (un à deux ordres de grandeur) que les mesures en laboratoire. Ceci pourrait être la conséquence d'une anisotropie des conductivités hydrauliques, mais cette dernière ne peut, à elle seule, justifier l'importance des différences constatées qui sont vraisemblablement liées aux méthodes de mesures mêmes. Alors que les essais in situ influence la formation-hôte sur un diamètre de quelques mètres autour du forage, que les mesures en laboratoire sont confinées à quelques centimètres cubes.

Géochimie et migration

L'eau interstitielle de la Formation de Courtrai est salée à saumâtre (entre 6 000 et 13 500 mg.l⁻¹ de Cl⁻).

Des essais de migration avec de l'eau tritiée et de l'iode ont été effectués sur des carottes des forages de Doel-1a afin, d'une part, de déterminer les paramètres de migration des Argiles Yprésiennes pour des radionucléides non retardés et, d'autre part, d'évaluer l'homogénéité de cette formation en matière de migration. Les paramètres de migration (ηR et D_{app}) obtenus pour HTO et ¹³¹I sont comparables à ceux de l'Argile de Boom. Dans les limites des données acquises, les Argiles Yprésiennes apparaissent, à l'aplomb du forage Doel-1a, relativement homogènes d'un point de vue des paramètres de migration des radionucléides non retardés.

3.8.4 Les perspectives

Les prochains efforts en matière de caractérisation des Argiles Yprésiennes porteront d'abord sur l'interprétation et l'exploitation des données acquises jusqu'à présent et encore en cours d'acquisition. Sur cette base, une première évaluation des performances de la barrière naturelle devrait être réalisée.

Même s'il est évident que le niveau de connaissance à atteindre pour la solution alternative ne doit, actuellement, en rien être comparable à celui existant pour la solution de référence, il sera important de se pencher en détail sur les spécificités des Argiles Yprésiennes par rapport à l'Argile de Boom et ce, notamment en vue d'une évaluation des possibilités de transfert des

acquis entre une formation et une autre. Parmi les spécificités qui sont susceptibles d'avoir un impact direct sur la faisabilité ou la sûreté d'un dépôt final, on peut pointer :

- la faible résistance mécanique qui pose question quant à la faisabilité des excavations ;
- la présence d'une eau interstitielle salée dont il conviendra d'analyser l'influence sur le choix des matériaux des barrières ouvragées et la conception des installations de dépôt (corrosion des métaux, comportement des argiles gonflantes, etc.). En outre, la spéciation et la migration de certains radionucléides, particulièrement ceux sensibles au potentiel d'oxydoréduction et à la présence d'agents complexants, risquent d'être modifiée ;
- la faible conductivité thermique qui pose question quant à la dissipation de la chaleur émise par les déchets calorifiques ;
- la possibilité d'une présence de voies préférentielles de migration (failles) au sein de la formation dont le rôle en matière de transfert des fluides devra être éclairci.

Vu la variabilité latérale importante des caractéristiques lithologiques des Argiles Yprésiennes il conviendra aussi de s'interroger sur la représentativité de la zone nucléaire de Doel vis-à-vis des propriétés à attendre de cette formation-hôte.

4 Evaluer la sûreté radiologique à long terme : scénarios d'évolution normale et altérée

Les évaluations de la sûreté radiologique à long terme d'un système de dépôt final en profondeur visent à montrer de façon indirecte mais convaincante que, quelle que soit l'échelle de temps considérée, ses conséquences radiologiques potentielles restent en deçà des limites jugées acceptables. Concrètement, ces évaluations consistent donc à tester les performances d'un tel système dans tous les scénarios d'évolution pertinents envisageables en utilisant différents modèles et codes de calcul ainsi que différents arguments quantitatifs et qualitatifs. Pour rendre les calculs possibles, elles se basent toutefois sur un système simplifié, doté d'un fonctionnement simplifié. Les hypothèses simplificatrices, y compris celles relatives à l'évolution du système dans le temps, sont toujours choisies de façon prudente, de sorte qu'elles se traduisent en principe par une surestimation de l'impact radiologique futur véritable. Les résultats des évaluations de sûreté doivent donc être considérés comme purement indicatifs : ce ne sont pas des prédictions.

L'évaluation de la sûreté à long terme d'un dépôt final en profondeur est un processus itératif de longue haleine. C'est ainsi que les évaluations présentées dans le rapport SAFIR 2, qui ont pour la plupart commencé début 1997, s'appuient sur les cinq évaluations de sûreté réalisées dans le cadre de la première phase du programme de recherche et développement méthodologique de l'ONDRAF et du CEN-SCK (1974-1989) et de la première moitié de sa deuxième phase (table 4.1). Ces évaluations qui, à part la troisième, s'inscrivaient toutes dans le cadre de projets de la Commission européenne, et qui étaient initialement des évaluations exploratoires, fortement simplifiées, ont progressivement évolué vers des évaluations de mieux en mieux étayées et de plus en plus fines, car pouvant utiliser de plus en plus de données expérimentales précises et fiables ainsi que des codes de calcul de plus en plus performants.

D'une manière générale, depuis le rapport SAFIR, la méthodologie des évaluations de sûreté à long terme, et en particulier le développement des scénarios, s'est donc développée et systématisée, sur base non seulement des acquis des études précédentes mais aussi des développements internationaux en la matière. Elle est aujourd'hui devenue un outil performant de test et de compréhension du fonctionnement du système de dépôt dans son ensemble et de ses différents composants pris séparément. Elle a par conséquent permis de mieux identifier les processus et caractéristiques qui déterminent la sûreté du système, de même que les différents types d'incertitudes qui ne peuvent être évitées et leur importance relative. Ces incertitudes, et surtout le fait qu'elles augmentent fortement avec l'évolution du système de dépôt dans le temps, sont maintenant mieux prises en compte grâce à l'introduction de différents modes de raisonnement et de calcul et grâce à l'utilisation d'indicateurs de sûreté différents pour les différentes phases de l'évolution du système.

Alors que le rapport SAFIR n'abordait la sûreté radiologique à long terme d'un dépôt en profondeur que pour les déchets vitrifiés, les évaluations de sûreté effectuées depuis lors ont examiné l'impact radiologique de pratiquement toutes les classes de déchets des catégories B et C qui devront être mises en dépôt en profondeur. L'accent a toutefois été mis sur les trois

classes de déchets dotées des activités spécifiques les plus élevées : les déchets vitrifiés, les combustibles usés, et les coques et embouts. L'inventaire des autres classes de déchets doit en effet encore être précisé et, de plus, l'architecture de dépôt pour ces déchets n'a pas encore été développée. Par ailleurs, les évaluations de sûreté à long terme effectuées à ce jour ont essentiellement porté sur le scénario d'évolution normale, les scénarios d'évolution altérée ayant seulement fait l'objet d'évaluations préliminaires et partielles. Enfin, étant donné la différence de niveau entre les connaissances relatives à l'Argile de Boom et celles relatives aux Argiles Yprésiennes, ces évaluations portent uniquement sur une installation de dépôt de référence construite dans l'Argile de Boom, plus précisément sous la zone nucléaire de Mol-Dessel.

Ce quatrième chapitre consacré à l'évaluation de la sûreté radiologique à long terme d'un dépôt final en profondeur explique la méthodologie développée, y compris la méthodologie de développement des scénarios, motive l'introduction de nouveaux indicateurs de sûreté en complément des indicateurs de sûreté radiologiques classiques et présente les principaux résultats des évaluations effectuées : concrètement, toutes les évaluations effectuées pour tous les scénarios considérés confirment le rôle prépondérant de la barrière géologique. Enfin, il aborde très brièvement la question de la sous-criticité d'un dépôt final en profondeur.

4.1	La méthodologie des évaluations de sûreté à long terme	4.4
4.1.1	Le développement des scénarios	4.4
4.1.2	L'évaluation des scénarios	4.6
4.2	Le développement des scénarios	4.8
4.2.1	L'identification des scénarios	4.9
4.2.2	La description des scénarios	4.10
4.2.2.1	Scénario d'évolution normale	4.11
4.2.2.2	Scénarios d'évolution altérée	4.15
4.3	L'évaluation des scénarios	4.17
4.3.1	Les arguments quantitatifs et qualitatifs	4.17
4.3.1.1	Indicateurs de sûreté classiques	4.18
4.3.1.2	Indicateurs de sûreté et de performance alternatifs	4.19
4.3.1.3	Arguments qualitatifs	4.20
4.3.2	L'évaluation du scénario d'évolution normale	4.20
4.3.2.1	Calculs de doses	4.20
4.3.2.2	Calculs d'indicateurs de sûreté et de performance alternatifs	4.36
4.3.3	L'évaluation des scénarios d'évolution altérée	4.38
4.3.4	Résultats et considérations complémentaires	4.40
4.4	La sous-criticité	4.45
4.5	Les perspectives	4.45

Table 4.1 Aperçu des évaluations de sûreté relatives au dépôt en profondeur effectuées avant 1996 dans le cadre du programme belge.

	PAGIS (1988)	PACOMA (1990)	Updating 1990 (1992)	Combustibles usés (1995)	EVEREST (1996)
Objectifs	développer une méthodologie d'évaluation de la sûreté d'un dépôt en profondeur et faire une 1 ^o évaluation de son im-pact radiologique à long terme	compléter les résultats de PAGIS	actualiser les résultats de PAGIS et PACOMA sur la base des nouvelles données du programme électronu-cléaire belge et de la recherche	faire une 1 ^o évaluation de la sû-reté du dépôt final direct des combustibles usés en appliquant la méthodologie de l'étude Updating 1990	déterminer systématiquement et de façon quantitative les différentes sources d'incertitu-de et leur importance relative dans une évaluation de sûreté
Données de base					
terme source	déchets vitrifiés	déchets de catégorie B	déchets vitrifiés et de cat. B	combustibles usés	déchets vitrifiés et de cat. B
inventaire	← 8180 tU →			← 4895 tU →	
indicateurs	← doses et risques, individuels et collectifs →			← dose individuelle →	
scénarios	← 1 d'évolution normale, 3 d'évolution altérée →			← 1 d'évolution normale →	← plusieurs, plus réalistes →
calculs	← déterministes et stochastiques →				
modèles		← fortement simplifiés →		← révisés →	← plus complexes →
Principaux résultats	<input type="checkbox"/> développement d'une méthodologie systématique <input type="checkbox"/> identification des compo-sants déterminants pour la sûreté (surtout l'argile) <input type="checkbox"/> indications que la solution étudiée peut être sûre <input type="checkbox"/> RN les plus critiques : ²³⁷ Np, ⁹⁹ Tc et ¹³⁵ Cs (¹²⁹ I et ³⁶ Cl pas étudiés)	<input type="checkbox"/> confirmation des principaux résultats de PAGIS <input type="checkbox"/> indications que la solution étudiée peut être sûre <input type="checkbox"/> RN les plus criti-ques : ¹⁴ C, ¹²⁹ I, ⁷⁹ Se et ⁹⁹ Tc	<input type="checkbox"/> confirmation des résultats de PAGIS et de PACOMA : l'impact radiologique max. est nettement inférieur à l'impact radiologique acceptable	<input type="checkbox"/> la dose annuelle max. est environ 100 × inférieure à celle due à la radioactivité naturelle et augmente avec le taux de combustion <input type="checkbox"/> confirmation de l'importan-ce de la migration et de la limite de solubilité des RN <input type="checkbox"/> RN les plus critiques : ¹²⁹ I, ¹⁴ C, ²³⁷ Np, ²²⁶ Ra et ²³¹ Pa	<input type="checkbox"/> les doses sont 2 à 100 × inférieures aux doses de l'étude Updating 1990 <input type="checkbox"/> mise en évidence de l'importance potentielle de la vitesse de Darcy dans les aquifères, en plus des paramètres décrivant la migration dans l'argile
Recommen-dations	étudier en profondeur les mécanismes de migration des principaux RN dans l'Argile de Boom		faire l'inventaire précis des RN criti-ques (surtout l' ¹²⁹ I), étudier les champs proche et lointain et évaluer précisément le rôle des aquifères et de la biosphère	étudier la dégradation des pastil-les de combustible	systematiser la définition des scénarios, préciser la limite de solubilité des RN criti-ques et approfondir l'étude de leur com-plexation et des effets de la migration des gaz

4.1 La méthodologie des évaluations de sûreté à long terme

La méthodologie des évaluations de sûreté à long terme, qui visent à tester les performances du système de dépôt final, est devenue beaucoup plus systématique depuis la publication du rapport SAFIR. Cette méthodologie s'appuie sur un large consensus au niveau international, notamment au sein de la Commission européenne, de l'AIEA et de l'AEN. Elle relève d'un processus à la fois progressif et itératif (fig. 4.1). *Progressif*, parce que chaque phase de la réalisation du système de dépôt doit faire l'objet d'une évaluation de sûreté intermédiaire qui contribue, ce faisant, à définir les priorités de recherche futures et à identifier les modifications éventuelles à apporter au système pour en améliorer la sûreté lors d'une phase ultérieure du projet. Ce processus de plusieurs dizaines d'années a débuté avec les travaux de recherche et développement méthodologique et s'achèvera un jour avec la décision de laisser le site du dépôt sans surveillance, autrement dit, de le banaliser. *Itératif*, parce que les différentes étapes de chaque évaluation de sûreté sont effectuées en boucle jusqu'à ce que la précision des résultats relatifs au niveau de sûreté atteint soit jugée suffisante. Ce niveau de sûreté fait alors l'objet d'un avis, qui résulte non seulement d'une comparaison de l'impact radiologique calculé avec des exigences ou des critères de sûreté tels que la contrainte de dose, mais surtout d'une évaluation de la fiabilité des résultats et de la marge d'optimisation qui subsiste. Cet avis est ensuite soumis à un examen critique indépendant, par exemple par les autorités de sûreté ou par une commission adéquate, qui décident d'autoriser ou non le passage à la phase suivante du programme.

Durant chacune des phases qui mènent à la réalisation du système de dépôt, l'évaluation de sûreté se base sur trois types d'éléments :

- la *stratégie de sûreté*, qui oriente l'ensemble de l'approche suivie pour parvenir à la fois à réaliser une solution de dépôt sûre et à démontrer que cette solution est sûre ;
- les *caractéristiques intrinsèques du système de dépôt* qui en déterminent la sûreté, autrement dit les propriétés du système de dépôt et leur contribution attendue aux fonctions de sûreté, la qualité du système de dépôt, ainsi que le mode de construction, d'exploitation, de fermeture et de contrôle de l'installation de dépôt ;
- les *éléments qui permettent une évaluation* scientifiquement correcte et convaincante du *niveau de sûreté* à long terme offert par le système de dépôt, autrement dit la méthodologie des évaluations de sûreté, assortie des mesures nécessaires d'assurance et de gestion de la qualité.

La méthodologie des évaluations de sûreté repose sur une approche en scénarios. Elle procède en deux grandes étapes : le développement des scénarios et leur évaluation.

4.1.1 Le développement des scénarios

Le développement des scénarios (voir section 4.2), qui consiste à imaginer et à décrire les grands types d'évolution que pourrait connaître le système de dépôt, se fait en deux étapes. La première consiste à identifier les caractéristiques du système de dépôt en profondeur, les

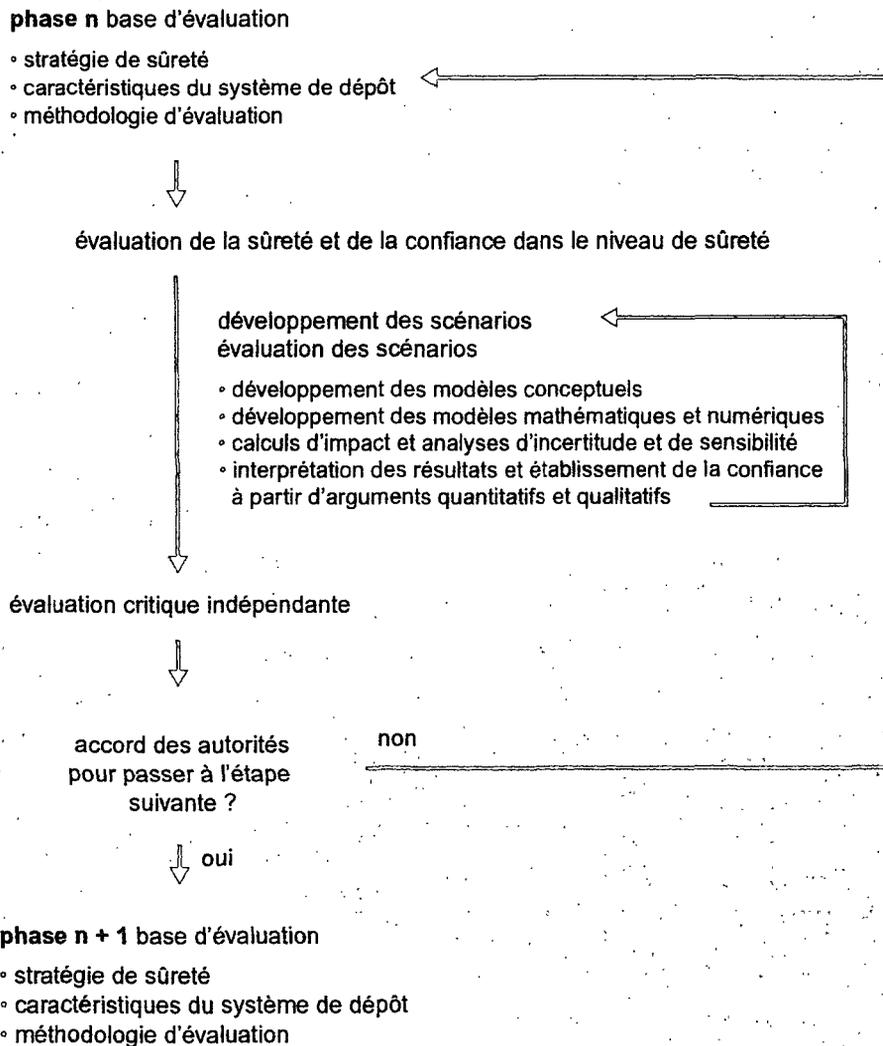


Figure 4.1 Le processus itératif des évaluations de sûreté à long terme, qui s'inscrivent dans le processus progressif et flexible de réalisation du système de dépôt final.

événements et les processus (*Features, Events, and Processes* ou FEPS) qui peuvent influencer son évolution à long terme et à les regrouper en scénarios après avoir éliminé les FEPS non pertinents pour la sûreté. La seconde consiste à décrire les scénarios, afin de permettre ensuite leur évaluation.

Les scénarios d'évolution reflètent différents futurs possibles du système de dépôt qui sont pertinents pour les évaluations de sûreté, mais ne sont pas des prédictions. Ils se répartissent en deux familles.

- Le *scénario d'évolution normale*, ou scénario de référence, considère tous les FEPS dont on est certain ou presque de la survenue et décrit donc la succession probable des événements attendus après la fermeture de l'installation de dépôt, événements qui s'accompagneront inéluctablement d'expositions radiologiques à très long terme.
- Les *scénarios d'évolution altérée* regroupent les événements ou processus perturbateurs éventuels, d'ordinaire peu probables, mais néanmoins susceptibles de modifier fortement le système de dépôt s'ils se produisent, et donc d'entraîner des expositions radiologiques.

4.1.2 L'évaluation des scénarios

L'évaluation des scénarios (voir section 4.3) se fait en quatre étapes : la modélisation conceptuelle, la modélisation mathématique et numérique, les calculs d'impact, y compris les analyses d'incertitude et de sensibilité, et, enfin, l'interprétation des résultats et l'établissement de la confiance (fig. 4.1).

Chacun des scénarios obtenus est décrit de la manière la plus précise possible en prenant des hypothèses simplificatrices raisonnables quant au comportement et au fonctionnement du système de dépôt. Bien qu'en raison de la complexité de ce dernier, il soit impossible d'en simuler tous les détails, cette *modélisation conceptuelle* peut, pour autant que le système soit robuste (voir section 2.2.2), se limiter à décrire les éléments et processus qui peuvent avoir une influence significative sur son fonctionnement, ce qui la rend plus fiable que la modélisation d'un système plus complexe. La modélisation du scénario d'évolution normale suppose que chaque barrière remplit la fonction de sûreté qui lui correspond ; celle des scénarios d'évolution altérée suppose qu'une ou plusieurs barrières fonctionnent moins bien ou sont tout simplement inopérantes. Les différents éléments à la base des modèles conceptuels sont les suivants :

- les *caractéristiques* du système de dépôt (constitué des déchets, de leur emballage et de leur suremballage éventuel, des autres barrières ouvragées et de la barrière géologique naturelle) et de son environnement (les aquifères et la biosphère) ;
- les *nombreux processus* (physiques, chimiques, biologiques, radiologiques, etc.) qui prennent place dans les différents composants du système de dépôt, dans son environnement et aux différentes interfaces : d'une part, les processus tels que la diffusion et l'advection, qui contribuent à la migration des radionucléides vers et dans la biosphère ; d'autre part, les processus qui influencent l'état et le fonctionnement des composants du système de dépôt, comme la corrosion des (sur)emballages, qui conduira à terme à leur perforation, et les processus qui interviendront dans la géosphère et dans la biosphère et qui se traduiront par un impact radiologique sur l'homme ;
- les *événements extérieurs* (glaciations, séismes, etc.) qui peuvent modifier les caractéristiques et le fonctionnement du système de dépôt et de son environnement.

Le fonctionnement du système de dépôt supposé dans chaque modèle conceptuel est alors traduit en un ou plusieurs *modèles mathématiques*, afin de pouvoir effectuer des simulations. Tous les processus importants identifiés sont décrits au moyen d'équations mathématiques,

dont l'équation de migration, qui est l'équation générale de loin la plus utilisée dans les évaluations de sûreté. Des solutions numériques de ces équations sont alors traduites sous forme algorithmique pour constituer les codes de calcul.

Pour chacun des scénarios identifiés, on réalise alors des simulations du comportement à long terme du système de dépôt, appelées *calculs d'impact*. En pratique, la complexité du système de dépôt et des processus à considérer ainsi que les échelles spatio-temporelles sont généralement telles qu'il est presque impossible de simuler son fonctionnement avec un seul code de calcul, de sorte qu'on en utilise plusieurs l'un après l'autre, chacun simulant le relâchement ou la migration des radionucléides dans un composant ou un ensemble de composants du système. L'interprétation des résultats des calculs d'impact est néanmoins considérablement compliquée par trois types d'incertitudes inévitables, mais dont l'influence sur le fonctionnement du système doit pouvoir être évaluée :

- les *incertitudes dans la description des scénarios*, autrement dit celles portant sur la question de savoir si tous les FEPS et tous les scénarios pertinents ont bien été pris en compte. Ces incertitudes peuvent être fortement réduites dans l'évaluation du scénario d'évolution normale grâce à la présence d'éléments de robustesse dans le système de dépôt. Elles peuvent toutefois rester particulièrement grandes dans le cas des scénarios d'évolution altérée.
- les *incertitudes dans les modèles conceptuels et mathématiques*, qui regroupent les incertitudes sur les processus, sur la définition spatiale des modèles, sur la représentation de l'environnement naturel et sur les conditions initiales et aux limites.
- les *incertitudes dans les valeurs des paramètres* des modèles, lesquelles sont dues au manque de connaissances ou au caractère aléatoire des valeurs des paramètres considérés, de même qu'aux incertitudes au niveau des mesures.

Les *analyses d'incertitude* et les *analyses de sensibilité*, qui font partie intégrante des calculs d'impact, ont pour but de répondre à la question de savoir à quel point les résultats obtenus sont sensibles aux incertitudes qui n'ont pu être éliminées. Les analyses d'incertitude visent à établir une limite supérieure de l'impact calculé en évaluant l'incertitude sur cet impact. Les analyses de sensibilité visent à déterminer quels processus ou composants influencent le plus la sûreté du système de dépôt et constituent ce faisant un instrument important dans l'identification des priorités de recherche et dans la définition des composants qui doivent être renforcés. Les analyses de sensibilité relatives aux incertitudes dans la description des scénarios et dans les modèles conceptuels utilisent souvent une approche déterministe, dans laquelle les paramètres ont des valeurs fixes. Les analyses de sensibilité et d'incertitude relatives aux incertitudes dans les valeurs des paramètres utilisent souvent une approche stochastique, dans laquelle les calculs sont répétés en échantillonnant les valeurs des paramètres dans leurs distributions statistiques respectives, lesquelles reflètent les incertitudes sur ces valeurs.

Enfin, l'*interprétation des résultats* des évaluations de sûreté au terme des analyses d'incertitude et de sensibilité et la *confiance* dans ces résultats reposent non seulement sur la comparaison de différents indicateurs de sûreté avec les normes radiologiques en vigueur et

les caractéristiques radiologiques de référence du milieu de dépôt et de son environnement, mais aussi sur une série d'arguments qualitatifs, comme la qualité de la méthodologie d'évaluation (méthode de développement des scénarios, modes de raisonnement, modèles conceptuels, codes de calcul, etc.) et la qualité de toutes les informations et données de base relatives aux déchets, au site de dépôt et aux barrières ouvragées (voir section 4.3.1). Cette confiance est un aspect essentiel des évaluations de sûreté, dans la mesure où c'est chaque fois elle qui conditionne le passage d'une étape du processus progressif de réalisation du système de dépôt à la suivante. Les principaux éléments qui peuvent contribuer à l'augmenter sont les suivants :

- *traitement des incertitudes dans la description des scénarios* : emploi de catalogues de FEPS établis et vérifiés au niveau international, établissement d'une méthode de construction des scénarios structurée et traçable et vérifiée par d'autres experts, analyse du système de dépôt aux différentes périodes considérées et emploi de différents types de calcul, modes de raisonnement et indicateurs de sûreté pour chacune de ces périodes.
- *traitement des incertitudes dans les modèles conceptuels et mathématiques* :
 - emploi de plusieurs modèles conceptuels en cas d'incertitude quant aux mécanismes exacts qui interviennent.
 - vérification des codes de calcul utilisés (c'est-à-dire vérification du fait qu'ils sont des traductions mathématiques correctes des modèles conceptuels et qu'ils calculent correctement) : comparaison des résultats de chaque code avec ceux d'un code développé de façon complètement indépendante, mise en œuvre d'une procédure d'assurance de la qualité, exercices de comparaison à l'échelle internationale et vérifications des calculs par d'autres experts.
 - établissement de la confiance dans les modèles (c'est-à-dire démonstration du fait que les modèles ou codes utilisés reflètent la réalité avec la précision voulue, compte tenu du but recherché) : validation des modèles utilisés pour les différents composants du système de dépôt à l'aide d'expériences dont les résultats peuvent être comparés à ceux des simulations (une validation stricte des modèles est toutefois souvent impossible, étant donné les échelles temporelles et spatiales considérées dans les évaluations), recours aux analogies naturelles, emploi de différentes méthodes de raisonnement, et démonstration du fait que les calculs effectués s'appuient sur une base scientifique solide.
- *traitement des incertitudes dans les valeurs des paramètres* : réalisation des mesures et expériences complémentaires nécessaires, établissement de distributions de probabilité statistiques pour les valeurs des paramètres ainsi que réalisation de calculs stochastiques et déterministes pour les analyses d'incertitude et de sensibilité.

4.2 Le développement des scénarios

Comme la méthodologie des évaluations de sûreté à long terme, la méthodologie de développement des scénarios a été systématisée durant la période 1990–2000, afin de réduire les risques d'oubli d'événements ou de processus importants dans les évaluations de sûreté. La

sélection des FEPS ainsi que celle des scénarios et des variantes à analyser se fait en outre désormais de façon transparente et traçable. Cette méthodologie, qui fait l'objet d'un consensus international, procède en deux étapes : l'identification des scénarios et la description des scénarios.

4.2.1 L'identification des scénarios

L'identification des scénarios représentatifs des différentes évolutions à long terme possibles du système de dépôt en profondeur considéré débute avec l'identification des FEPS qui peuvent a priori l'influencer. Le catalogue des FEPS pouvant avoir un impact sur la sûreté à long terme d'un dépôt dans l'argile a été établi à partir d'un des catalogues génériques développés et régulièrement revus au niveau international, le catalogue de l'AEN. Le catalogue belge se réduit les 134 FEPS génériques à 60 FEPS par élimination de ceux qui peuvent être considérés comme non pertinents et de ceux qui ne concernent que la biosphère et ont été repris dans le modèle de la biosphère plutôt que dans le développement des scénarios. Il donne une définition de chaque FEP ainsi qu'une discussion courte de sa pertinence ou de son impact potentiel pour le système de dépôt considéré et les raisons qui ont amené à le retenir ou pas. Il est divisé en trois grandes catégories, elles-mêmes divisées en sous-catégories (table 4.2).

Table 4.2 Classification des FEPS.

Catégories et sous-catégories de FEPS, et exemples

Phénomènes naturels

- d'origine extraterrestre* : impact de météorites
- géologiques* : diagenèse, élévation ou abaissement du niveau du sol, sismicité, tectonique
- climatiques* : précipitations extrêmes, fonte des neiges et inondations, changement du niveau des mers
- géomorphologiques* : érosion, déplacement du lit des rivières, transport et dépôt de sédiments marins
- hydrologiques* : infiltrations d'eaux souterraines, modifications des caractéristiques des écoulements
- de migration et géochimiques* : advection et dispersion, formation, dissolution et migration de colloïdes
- effets des radionucléides sur l'écologie* : assimilation par les plantes, pédogenèse

Activités humaines

- conception et construction* : défauts dans les matériaux, effets chimiques, effets de l'excavation
- exploitation et fermeture* : mauvais remblayage, hétérogénéité des déchets, mauvais scellement
- intrusions* : forage d'exploration, recherche archéologique, pompage d'eau souterraine
- activités postérieures à la fermeture* : pertes d'informations relatives au dépôt, irrigation

Effets directement liés à la présence des déchets et de l'installation de dépôt

- effets thermiques* : modifications hydrologiques, modifications physicochimiques
 - effets chimiques et biologiques* : corrosion des métaux, apport de substances complexantes
 - effets mécaniques* : déformation des colis de déchets, modifications du champ des contraintes in situ
 - effets radiologiques* : radiolyse, changement des propriétés des matériaux
-

Les FEPS retenus sont alors systématiquement regroupés en scénarios qui reflètent différents futurs possibles du système de dépôt pertinents en termes de sûreté. Ce regroupement s'effectue après avoir identifié les principaux états possibles du système, lesquels s'obtiennent en supposant que chacun de ses trois composants principaux — barrières ouvragées, barrière géologique et aquifères — soit reste en état d'assurer sa fonction initiale (il est intact), soit est perturbé et ne peut plus le faire (il est « court-circuité »). Cette approche conduit à 8 états principaux possibles, dont l'un correspond au scénario d'évolution normale du système (table 4.3). Les eaux souterraines y tiennent une place centrale en raison de leur rôle dans la dégradation progressive des barrières ouvragées et dans la migration des radionucléides vers la biosphère. Tous les FEPS qui ne sont pas repris dans le scénario d'évolution normale peuvent alors être associés à un ou plusieurs des sept autres états du système. Ceux qui peuvent conduire à un même état du système sont, dans la mesure du possible, réunis dans le même scénario d'évolution altérée, chacun des huit scénarios d'évolution altérée retenus pouvant posséder plusieurs variantes. (La probabilité d'occurrence de deux de ces FEPS — la survenue d'une glaciation et le transport par les gaz — dépendant fortement de leur ampleur, est traitée tant dans deux scénarios d'évolution altérées.)

Table 4.3 Classification de FEPS en fonction de l'état du système de dépôt et de son environnement (1 = composant intact ; 0 = composant « court-circuité »).

No de l'état du système	Etat de la barrière ou du composant			Exemples de FEPS (Ces FEPS sont ceux qui donnent leur nom aux huit scénarios d'évolution altérée.)
	Barrières ouvragées	Barrière géologique	Aquifères	
1	1	1	1	état normal du système
2	1	1	0	forage d'exploitation, effet de serre
3	1	0	1	activation d'une faille, transport par les gaz, mauvais scellement
4	1	0	0	glaciation sévère
5	0	1	1	défaillance prématurée d'une barrière ouvragée
6	0	1	0	(aucun FEP)
7	0	0	1	activation d'une faille, transport par les gaz
8	0	0	0	glaciation sévère, forage d'exploration

4.2.2 La description des scénarios

La description des scénarios d'évolution comporte deux volets : d'une part, une description de l'évolution dans le temps du système de dépôt et de son environnement conforme au scénario considéré ; d'autre part, une description des principaux processus impliqués dans la migration des radionucléides vers la biosphère, description qui se simplifie dans le cas d'un système de dépôt robuste. Bien entendu, l'évolution dans le temps du système de dépôt et de son environnement constitue l'une des principales sources d'incertitudes dans la description des

scénarios, et donc aussi dans les modèles conceptuels et les valeurs des paramètres. Il est dès lors indispensable de distinguer différentes périodes dans les évaluations de sûreté et d'estimer parallèlement la robustesse des différents composants du système de dépôt qui exercent une fonction de sûreté, autrement dit d'estimer la mesure dans laquelle leur comportement futur peut être évalué de façon fiable (fig. 4.2).

4.2.2.1 Scénario d'évolution normale

Le scénario d'évolution normale est celui d'une dégradation lente et progressive de la capacité de confinement du système de dépôt suite à des processus naturels, les caractéristiques actuelles de l'environnement du système de dépôt étant supposées se maintenir dans le temps. Cette dégradation inévitable permet le relâchement de radionucléides dans la biosphère et entraîne donc, à terme, l'exposition radiologique d'individus du groupe de référence.

Concrètement, les *colis de déchets* et les *matériaux de remblayage* se dégraderont inévitablement avec le temps. La durée de vie escomptée des matrices de conditionnement varie d'une centaine d'années (matrices de bitume et de ciment) à plusieurs dizaines ou même plusieurs centaines de milliers d'années (matrices vitreuses et matrices d'oxyde d'uranium respectivement). Celle des (sur)emballages peut varier d'environ 1 000 ans à plusieurs dizaines de milliers d'années dans le cas de (sur)emballages résistant à la corrosion. Enfin, un matériau de remblayage à base d'argile peut a priori exercer sa fonction de barrière durant plusieurs milliers d'années, pour autant qu'il ne subisse pas de transformations minéralogiques ou chimiques suite à une augmentation de température trop élevée.

Par ailleurs, les théories actuelles basées sur la théorie orbitale de Milankovitch relative aux prédictions climatiques prévoient une période glaciaire modérée après environ 24 000 ans et une période glaciaire plus sévère après environ 56 000 ans. Ces périodes causeront des modifications considérables dans la partie supérieure de la géosphère et, par conséquent, des modifications des *aquifères*, de sorte que les modèles détaillés de l'hydrogéologie développés pour les conditions géographiques et climatiques actuelles ne seront vraisemblablement plus représentatifs des conditions qui règneront après 15 000 à 20 000 ans. Par contre, la *barrière géologique* devrait rester relativement inchangée durant au moins 100 000 ans. De 100 000 ans à un million d'années, des bouleversements de la topographie suite à l'alternance de périodes glaciaires et interglaciaires et aux mouvements de l'écorce terrestre pourront entraîner une modification de la profondeur de la formation argileuse. Au-delà de un million d'années, les caractéristiques de la couche argileuse pourront aussi changer suite à des mouvements de l'écorce terrestre et à des processus tectoniques, métamorphiques, de diagenèse et géomorphologiques, de sorte que son comportement deviendra très incertain. Des calculs récents, qui prennent en compte l'influence de l'effet de serre sur le climat, indiquent toutefois que les diminutions des températures attendues sur base de la théorie de Milankovitch seront fortement réduites par l'effet de serre (voir sections 4.2.2.2 et 4.3.3).

Enfin, bien avant tout cela, en l'espace de quelques dizaines d'années vraisemblablement, les modifications continues des pratiques agricoles et des habitudes alimentaires ainsi que les

autres activités humaines futures, par définition impossibles à prévoir, auront vraisemblablement entraîné des changements majeurs dans la *biosphère*.

Un des aspects les plus difficiles des évaluations de sûreté d'un système de dépôt en profondeur consiste donc à déterminer comment adapter les calculs de l'impact radiologique (calculs quantitatifs, semi-quantitatifs ou raisonnements qualitatifs) en fonction de l'échelle de temps sur laquelle ils portent afin qu'ils aient le maximum de signification. Ainsi, alors qu'il semble possible d'estimer quantitativement l'impact d'un système de dépôt sur quelques milliers d'années, il devient de plus en plus difficile de le faire au-delà. Ce qui compte toutefois, c'est que les évaluations de sûreté fournissent des arguments qui permettent de penser que l'impact radiologique du système de dépôt n'augmentera pas de manière significative à très long terme, par exemple parce que son inventaire radiologique aura été épuisé avant cela. Les calculs sont donc parfois poursuivis jusqu'à 100 millions d'années.

ROBUSTESSE

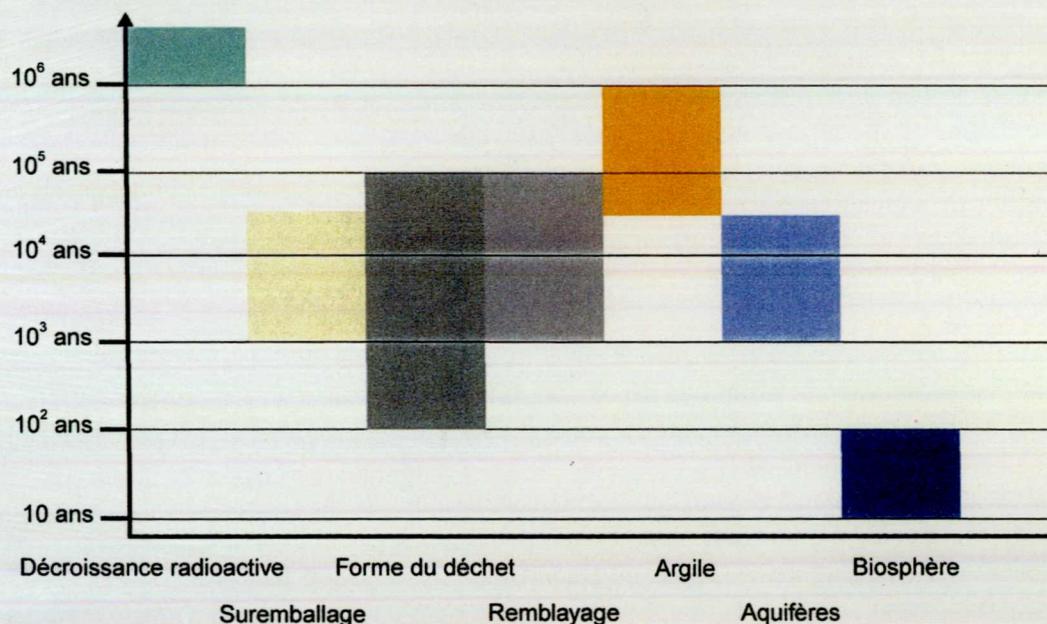


Figure 4.2 Événements extérieurs probables susceptibles d'affecter l'évolution dans le temps du système de dépôt et de son environnement, robustesse des principaux composants du système et de son environnement et évolution du type de calculs effectués dans les évaluations de sûreté.

Pour contourner la difficulté que pose le caractère imprévisible de la plupart des changements qui affecteront le système de dépôt et pour pouvoir justifier les hypothèses quantitatives faites pour évaluer son impact radiologique à long terme, les évaluations de sûreté doivent avoir recours à certains artifices. Plus précisément, elles utilisent une *hydrogéologie de référence*, calquée sur l'hydrogéologie actuelle et supposée constante dans temps, ainsi qu'une ou plusieurs *biosphères de référence*, définies chacune par un ensemble d'hypothèses basées

sur les pratiques et habitudes actuelles, et elles aussi supposées constantes dans temps. Elles utilisent également des *indicateurs de sûreté alternatifs*, qui ne tiennent pas compte du comportement, incertain, de l'environnement du système de dépôt (voir section 4.3.1).

Le scénario d'évolution normale décrit de façon qualitative le fonctionnement attendu du système de dépôt à partir des composants pris en compte dans les évaluations de sûreté (fig. 4.3).

- Les seules *matrices de déchets* qui exercent un rôle de résistance à la lixiviation suffisamment important pour être repris dans les évaluations de sûreté sont les matrices de verre, d' UO_2 et d' $\text{UO}_2 - \text{PuO}_2$. Les matrices de ciment peuvent toutefois sorber certains radionucléides qui ne sont pas sorbés par l'argile et peuvent donc être prises en compte dans certains cas. Enfin, le rôle potentiellement négatif du gonflement et des produits de dégradation des matrices de bitume sur les propriétés de migration de l'argile doit également être pris en compte.
- Les (*sur*)*emballages étanches* assurent le confinement physique des déchets, pendant au moins 300 ans pour les déchets vitrifiés et pendant au moins 2000 ans pour les combustibles usés.
- Bien que la contribution du *matériau de remblayage* au retard et à l'étalement du relâchement soit négligeable par rapport à celle de l'Argile de Boom dans la plupart des calculs d'impact, elle peut être significative dans le cas de radionucléides qui ne sont pas sorbés par l'argile mais bien par le matériau de remblayage.
- La *zone perturbée par l'excavation* est prise en compte dans l'estimation de l'épaisseur effective de la barrière argileuse.
- La *couche d'argile non perturbée* est la principale barrière à la migration des radionucléides en solution dans l'eau interstitielle. Ils y migrent principalement par diffusion moléculaire et de façon très limitée seulement par advection. Ce faisant, nombre d'entre eux sont sorbés par les minéraux argileux ou par les matériaux organiques présents dans l'argile. La complexation possible de certains radionucléides retardés par des matériaux organiques mobiles, qui peut accélérer leur migration, et l'échange possible de radionucléides entre des matériaux organiques mobiles et immobiles compliquent la modélisation. (La problématique du transport par les gaz, qui concerne principalement les déchets de catégorie B, est traitée dans le scénario d'évolution altérée parce que les mécanismes de transport diffèrent fortement du processus de diffusion.)
- Après leur migration dans l'Argile de Boom, les radionucléides atteignent les *aquifères*, qui ne remplissent aucun rôle de barrière mais qui au contraire diluent et dispersent les radionucléides qui n'ont pas été retenus par la barrière géologique. Les mécanismes de migration prédominants sont ici l'advection sous l'influence des écoulements d'eau et la dispersion, la diffusion étant le plus souvent négligeable. Les radionucléides peuvent également être sorbés dans les aquifères par les minéraux qui y sont présents.
- Enfin, certains radionucléides qui ont atteint les aquifères peuvent finir par atteindre la *biosphère* par trois mécanismes : le drainage des eaux souterraines vers des rivières ou éventuellement des étendues d'eau, la pollution des sols par les eaux souterraines et le captage d'eau souterraine. Dans ce dernier cas, le seul où les radionucléides atteignent la

biosphère suite à une intervention de l'homme, le scénario d'évolution normale ne considère que le captage d'eau dans l'aquifère du Néogène, le captage d'eau dans l'aquifère sous-jacent du Sous-Rupélien étant considéré dans le scénario d'exploitation (voir section 4.2.2.2). Le scénario d'évolution normale suppose que ce captage est localisé de façon particulièrement défavorable, à savoir profondément dans l'aquifère, à la périphérie de l'installation de dépôt et en aval par rapport à la direction naturelle d'écoulement (fig. 4.4). Il suppose aussi que le débit de pompage est relativement faible ($5\,000\text{ m}^3$ par an), de sorte qu'il n'y a pas de dilution de l'eau pompée par de l'eau moins polluée drainée des couches moins profondes.

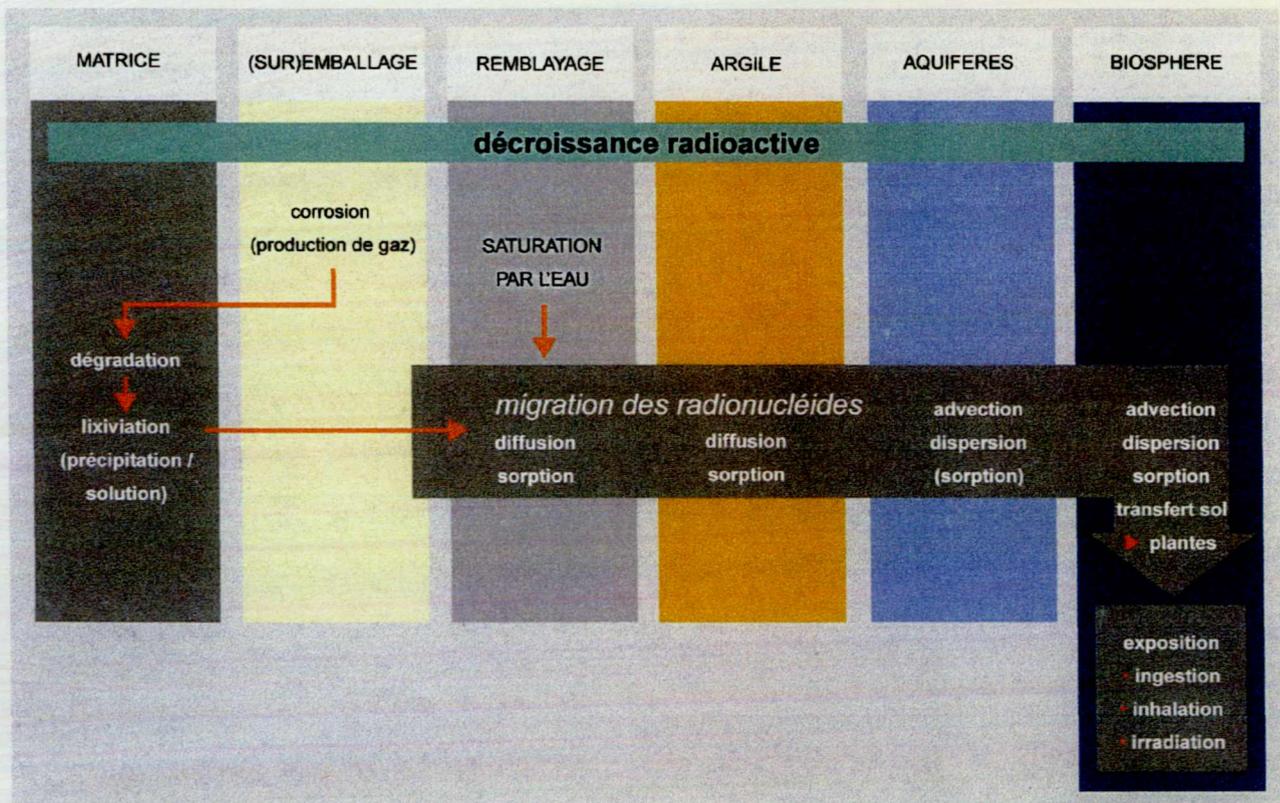


Figure 4.3 Principaux composants du système de dépôt et de son environnement et principaux processus considérés dans la description du scénario d'évolution normale.

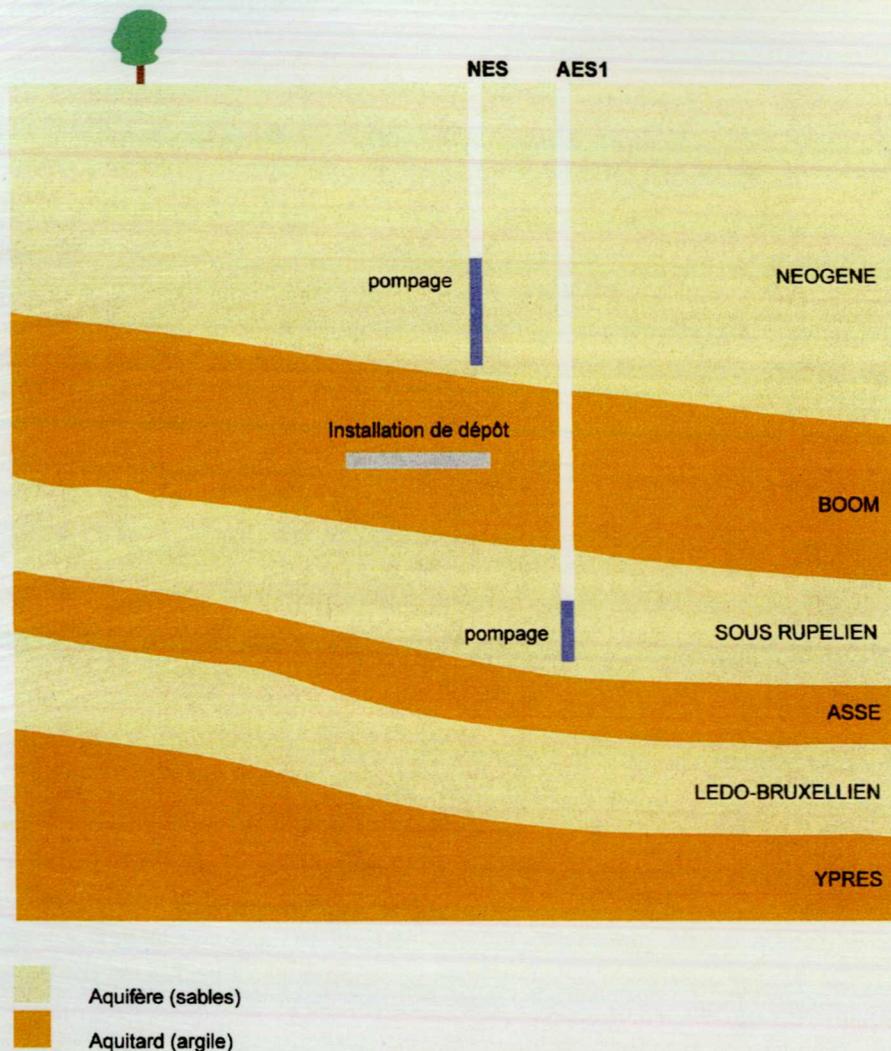


Figure 4.4 Représentation schématique du scénario d'évolution normale (captage d'eau) et du scénario de forage d'exploitation.

4.2.2.2 Scénarios d'évolution altérée

Les huit scénarios d'évolution altérée considérés dans les évaluations de sûreté à long terme sont décrits comme suit.

- *Le scénario de forage d'exploitation* (état 2, table 4.3 ; fig. 4.4) envisage le forage d'un puits de captage dans l'aquifère du Sous-Rupélien, sous l'Argile de Boom, à proximité immédiate du dépôt, et l'utilisation de l'eau pompée pour l'irrigation et pour l'alimentation en eau potable. Ce scénario n'est pas repris dans le scénario d'évolution normale en raison du fait que la qualité de cette eau la rend impropre à la consommation directe par l'homme et que la conductivité hydraulique de cet aquifère est tellement faible qu'il est impossible d'y pomper de grandes quantités d'eau. (Toutefois, le forage d'un puits dans l'aquifère sus-jacent du Néogène est traité dans le scénario d'évolution normale.)

- *Le scénario d'effet de serre* (état 2, table 4.3) envisage les changements dans l'aquifère du Néogène consécutifs au réchauffement climatique global que pourrait entraîner l'effet de serre dans les prochains siècles.
- *Le scénario d'activation d'une faille* (états 3 et 7, table 4.3) envisage l'apparition d'une faille tectonique à travers l'Argile de Boom et l'installation de dépôt, en raison de la réactivation d'une ancienne faille suite à une augmentation de l'activité tectonique. Une telle faille entamerait a priori la capacité de confinement de la barrière géologique car, bien que cette dernière ne subirait pas de cassure nette grâce à sa plasticité élevée, les propriétés hydrauliques dans le plan de la faille seraient susceptibles de se modifier par rapport à celles de l'argile intacte.
- *Le scénario de glaciation sévère* (états 4 et 8, table 4.3) envisage que, durant une période glaciaire future plus sévère que les trois dernières périodes glaciaires du Quaternaire, la calotte glaciaire qui se formera en Scandinavie s'étendra jusqu'à la région de Mol-Dessel, entraînant des phénomènes d'érosion susceptibles d'affecter l'Argile de Boom, voire même les barrières ouvragées. (La survenue d'une période glaciaire comparable aux trois dernières périodes glaciaires du Quaternaire est couverte par le scénario d'évolution normale.) Dans le cas d'un dépôt situé à environ 200 mètres de profondeur, ces phénomènes pourraient entamer la formation géologique au point que des fragments des déchets mis en dépôt se retrouveraient en surface, où ils pourraient avoir un impact radiologique direct sur l'homme s'il revenait vivre à proximité du dépôt au terme de la période en question.
- *Le scénario de mauvais scellement* (état 3, table 4.3) suppose que les galeries principales et un puits d'accès ont été mal scellés et qu'ils peuvent dès lors constituer une voie de migration préférentielle pour les radionucléides. Il suppose en outre que la conductivité hydraulique dans les galeries principales et le puits d'accès serait supérieure de plusieurs ordres de grandeur à celle de l'Argile de Boom, de sorte que ces galeries se comporteraient comme d'énormes filtres drainant l'eau de la formation argileuse, ce qui pourrait causer un courant d'advection à travers les galeries et le puits. Pour renforcer encore l'effet possible de la filtration, ce scénario suppose enfin une inversion du gradient hydraulique dans l'Argile de Boom, qui deviendrait ascendant.
- *Le scénario de défaillance prématurée d'une barrière ouvragée* (état 5, table 4.3) possède plusieurs variantes, dont les conséquences seront fortement limitées pour autant que la couche d'argile reste intacte. Les variantes les plus graves sont la défaillance prématurée des (sur)emballages étanches, qui permettrait que les radionucléides relâchés entrent en contact avec les eaux souterraines alors qu'il y a encore des gradients thermiques élevés dans le champ proche, ou la dégradation rapide de la matrice de conditionnement des déchets vitrifiés et de celle des combustibles usés.
- *Le scénario de transport par les gaz* (états 3 et 7, table 4.3) envisage la formation dans certaines galeries de dépôt de beaucoup plus de gaz qu'il ne peut s'en échapper par diffusion. Ce phénomène entraînera la formation d'une phase gazeuse susceptible d'expulser de l'eau éventuellement contaminée à travers le champ proche. La pression de gaz dans le champ proche augmentera encore jusqu'à ce qu'elle provoque l'apparition d'une voie préférentielle de migration dans la formation argileuse, laquelle permettra au gaz de s'échapper. Elle augmentera ensuite à nouveau, jusqu'à ce que se produise un

nouvel échappement de gaz, et ainsi de suite. Ce gaz pourra être constitué au moins en partie de molécules radioactives et pourra accélérer la migration dans la barrière argileuse des radionucléides en solution. (Les effets d'une production modérée de gaz sont considérés dans le scénario d'évolution normale.)

- *Le scénario de forage d'exploration* (état 8, table 4.3) suppose qu'un forage de reconnaissance effectué sur le site de dépôt traverse l'installation de dépôt. Il possède deux variantes principales. La première, qui est un cas d'intrusion drastique, suppose le prélèvement de carottes contenant des fragments de déchets radioactifs et leur analyse en laboratoire en surface par des personnes ne se doutant pas qu'ils sont radioactifs. La seconde suppose que le forage effectué à travers l'installation de dépôt n'est pas remblayé et qu'il se remplira donc d'eau souterraine, laquelle entrera en contact avec les déchets radioactifs et entraînera la lixiviation des radionucléides, qui pourront contaminer l'aquifère.

4.3 L'évaluation des scénarios

Les évaluations de sûreté rapportées dans le rapport SAFIR 2 se sont fortement affinées par rapport à celles rapportées dans le rapport SAFIR. En effet, les simulations effectuées depuis 1997 ont bénéficié d'une évolution très nette des modèles et des codes de calcul et, de plus, l'interprétation des résultats s'appuie désormais sur des indicateurs de sûreté complémentaires aux indicateurs classiques. Plus précisément, alors que le rapport SAFIR présente essentiellement des évaluations très simplifiées, utilisant notamment des approches unidimensionnelles, un modèle de migration bidimensionnel et de nouveaux codes de calcul commerciaux permettent désormais de beaucoup mieux prendre en compte les principaux processus qui interviennent lors de la migration des radionucléides dans l'Argile de Boom et, en particulier, de mieux prendre en compte la solubilité des radionucléides. (Des simulations tridimensionnelles sont également devenues possibles, mais elles ne sont pas nécessaires.) Bien entendu, les calculs se fondent sur une description simplifiée du système de dépôt et de son fonctionnement, simplification qui est notamment facilitée grâce au fait que le système de dépôt est robuste (voir section 2.2.2).

4.3.1 Les arguments quantitatifs et qualitatifs

Les résultats des évaluations de la sûreté radiologique à long terme d'un système de dépôt final en profondeur doivent être interprétés non seulement au moyen d'indicateurs quantitatifs, mais également au moyen d'arguments qualitatifs. Plus précisément, ces interprétations reposent à la fois sur la comparaison des valeurs de deux groupes d'indicateurs avec les normes ou les valeurs de seuil applicables et sur l'évaluation de la qualité du raisonnement. Ces indicateurs et les bases de raisonnement qui les accompagnent possèdent un certain poids les uns par rapport aux autres, selon la phase considérée dans l'évolution du système de dépôt (fig. 4.5).

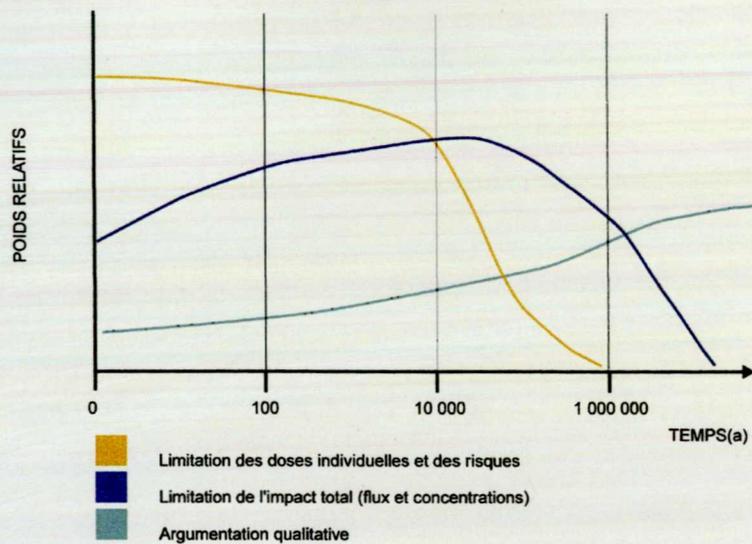


Figure 4.5 Poids relatifs des deux groupes d'indicateurs de sûreté et des arguments qualitatifs.

4.3.1.1 Indicateurs de sûreté classiques

Les indicateurs de sûreté classiques sont au nombre de trois : la dose efficace individuelle, le risque radiologique individuel et la dose efficace collective. Seuls les deux premiers ont toutefois véritablement valeur d'indicateurs pour un dépôt en profondeur. Ils doivent être inférieurs aux contraintes de dose et de risque applicables à cette pratique, contraintes qui sont établies de manière à tenir compte du fait que les individus du groupe de référence peuvent être exposés à plus d'une source ou pratique, et qui ne peuvent donc représenter qu'une fraction des limites respectivement de dose individuelle et de risque individuel (voir aussi section 2.1). Les évaluations de sûreté couvertes par le rapport SAFIR 2 utilisent les recommandations de la CIPR en la matière.

- La *dose efficace individuelle* (en mSv par an) à un individu du groupe de référence suite au relâchement progressif des radionucléides est utilisée dans le cas du scénario d'évolution normale. Elle doit être inférieure à la contrainte de dose qui, dans le cas de la mise en dépôt final de déchets radioactifs, ne doit pas dépasser 0.3 mSv par an selon la CIPR. (La plupart des pays lui imposent une valeur comprise entre 0.1 et 0.3 mSv par an.)
- L'évaluation des expositions potentielles se fait à l'aide de deux indicateurs, la dose efficace individuelle et la probabilité d'exposition à une dose donnée, qui constituent les deux facteurs du *risque radiologique individuel* calculé R_i . Ce risque est utilisé à la place de la dose efficace individuelle dans le cas des scénarios d'évolution altérée, car on ne peut exclure la possibilité que, malgré leur faible probabilité, ils donnent malgré tout lieu à une exposition supérieure à la contrainte de dose. Le niveau de sûreté d'un système de dépôt doit donc être tel que le risque radiologique couru par un individu du groupe de référence en un an suite à des événements perturbateurs, qui ne sont pas couverts pas le principe de la contrainte de dose, soit inférieur à la contrainte de risque. Le risque radiologique individuel est défini comme suit :

R_i = probabilité d'exposition à une dose donnée \times probabilité de décès suite à cette exposition

= probabilité d'exposition \times dose efficace individuelle \times facteur de risque

Pour les doses inférieures à 100 mSv, la CIPR considère que la probabilité de décès est proportionnelle à la dose, le facteur de proportionnalité ou facteur de risque qu'elle utilise pour l'ensemble de la population étant de $5 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$, et celui pour le sous-groupe des travailleurs étant de $4 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$. Si on tient également compte des cancers non mortels, le facteur de risque est de $7 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$.

- La *dose efficace collective* est un indicateur de l'impact radiologique total d'une pratique déterminée sur toute la population exposée, puisqu'elle prend en compte à la fois le nombre total de personnes exposées et la dose moyenne qu'elles ont reçue. Pour un dépôt en profondeur, l'incertitude sur les doses collectives calculées augmentant encore plus vite avec le temps que celle sur les doses individuelles, puisqu'il est de plus en plus difficile d'estimer le nombre total de personnes exposées, la dose collective n'est que peu utile en tant qu'indicateur de sûreté, ce que confirment les dernières recommandations de la CIPR (CIPR 81) en matière de protection radiologique spécifique à ce cas. Plus précisément, son emploi doit notamment être limité à quelques centaines à quelques milliers d'années après la fermeture de l'installation de dépôt et elle doit être interprétée comme une valeur relative et non comme un indicateur absolu de l'impact radiologique total. Son emploi dans l'optimisation de la protection radiologique, principalement durant l'étape d'exploitation, devra toutefois être considéré.

4.3.1.2 Indicateurs de sûreté et de performance alternatifs

Bien que les indicateurs de sûreté classiques « dose » et « risque » soient les principaux indicateurs de l'impact radiologique des pratiques contrôlées sur un individu du groupe de référence, leur utilisation doit être complétée par des indicateurs alternatifs pour l'évaluation de la sûreté d'un dépôt en profondeur. En effet, d'une part, on ne peut pas attendre de contrôle de radioprotection au moment de l'impact radiologique maximal attendu du dépôt ; d'autre part, l'incertitude sur l'impact radiologique estimé augmente au fur et à mesure qu'il est supposé se produire plus tard dans le temps, c'est-à-dire, paradoxalement, d'autant plus que le système de dépôt est performant. Cette incertitude résulte principalement des inconnues relatives à l'évolution de l'environnement du système de dépôt, qui est relativement moins robuste que le système de dépôt lui-même, puisqu'il est notamment sensible aux changements causés par l'homme et, dans le cas de l'hydrogéologie, aux changements climatiques. Elle n'est donc pas directement liée aux fonctions de sûreté principales du système. Les indicateurs de sûreté classiques doivent donc si possible être complétés par des indicateurs complémentaires de l'impact radiologique, de préférence des indicateurs qui sont moins sensibles aux incertitudes croissantes avec le temps. C'est par exemple le cas des indicateurs de sûreté relatifs aux fonctions de sûreté exercées par les barrières du système de dépôt (voir section 2.2.1).

Les principaux indicateurs de sûreté relatifs aux fonctions de sûreté sont ceux qui se rapportent à la fonction de retard et d'étalement du relâchement, soit la *densité de flux de*

radionucléides (en Bq·m⁻² par an) ou le flux total de radionucléides (en Bq par an) entre le système de dépôt et son environnement, et les concentrations résultantes en radionucléides (en Bq·m⁻³) dans les aquifères et dans différentes parties de la biosphère. Ce sont des indicateurs sensibles de la robustesse du système de dépôt, puisqu'ils se rattachent à une fonction de sûreté qui est assurée par des barrières robustes. Leurs valeurs peuvent être comparées aux quantités de radionucléides naturellement présents dans la géosphère et, plus particulièrement, aux concentrations en radionucléides naturellement présents dans l'eau interstitielle. Deux autres grandeurs peuvent également donner des indications quant aux performances du système de dépôt. Ce sont, d'une part, le *facteur de confinement*, autrement dit le rapport entre l'activité totale mise en dépôt et l'activité cumulée relâchée par le système de dépôt, et, d'autre part, l'*inventaire total en uranium* mis en dépôt, qui peut être comparé à l'activité alpha naturellement présente à proximité de l'installation de dépôt.

4.3.1.3 Arguments qualitatifs

Les arguments qualitatifs utilisés pour interpréter les résultats des évaluations de sûreté et pour établir la confiance portent sur la façon même dont ces évaluations ont été effectuées (voir aussi section 4.1.2). Plus précisément, ils portent sur la qualité des raisonnements, qui doivent être logiques et transparents, et avoir été soumis à l'évaluation d'experts externes, ainsi notamment que sur la qualité des modèles, qui doivent concorder avec les connaissances scientifiques disponibles, et sur celle des codes de calcul et des valeurs utilisées pour les paramètres. L'approche qualitative vise donc à répondre à une série de questions du type « a-t-on considéré tous les processus pertinents ? », « le système de dépôt et son fonctionnement ont-ils été correctement simplifiés ? », ou encore « les hypothèses sont-elles suffisamment prudentes ? ».

4.3.2 L'évaluation du scénario d'évolution normale

Les évaluations de sûreté du scénario d'évolution normale mènent au calcul, d'une part, de la dose à un individu du groupe de référence et, d'autre part, d'indicateurs de sûreté et de performance alternatifs, qui sont des résultats intermédiaires du calcul de la dose. Ces évaluations sont surtout basées sur des calculs déterministes dits de *best estimate*, ce qui signifie qu'ils utilisent les meilleures estimations possibles des valeurs des paramètres. Elles sont parfois complétées par des calculs stochastiques, qui prennent en compte les incertitudes dans les valeurs des paramètres et dont les résultats sont utilisés pour réaliser des analyses d'incertitude et de sensibilité.

4.3.2.1 Calculs de doses

Les calculs de doses se font en trois étapes.

- Les simulations de la migration des radionucléides dans le champ proche et dans l'Argile de Boom conduisent au flux d'activité à l'interface entre celui-ci et l'aquifère du Néogène.

Ces calculs sont basés sur un modèle du terme source différent pour chacune des trois classes de déchets considérées, soit les déchets vitrifiés, les combustibles usés, et les coques et embouts.

- Les simulations de la migration des radionucléides dans l'aquifère du Néogène conduisent aux concentrations en radionucléides dans l'eau captée dans un puits qui aboutit juste au-dessus de l'installation de dépôt et aux flux d'activité vers les cours d'eau. Ces calculs sont identiques pour les trois classes de déchets considérées.
- Le calcul des transferts des radionucléides dans la biosphère et des expositions conduit aux doses proprement dites.

Flux d'activité dans le système de dépôt et à l'interface entre l'Argile de Boom et l'aquifère du Néogène

Les données de base ainsi que les hypothèses simplificatrices utilisées pour calculer la migration des radionucléides dans le système de dépôt portent sur l'architecture du système de dépôt, les caractéristiques du champ proche et de la formation-hôte, les processus de migration dominants et les valeurs des paramètres qui les gouvernent, l'évolution temporelle du système de dépôt et, bien entendu, l'inventaire quantitatif et qualitatif des déchets à mettre en dépôt.

L'architecture de dépôt considérée dans les évaluations de sûreté consacrées aux déchets vitrifiés et aux combustibles usés est pratiquement identique à l'architecture de référence (voir section 3.3.1) ; quant aux coques et embouts, qui ne sont pas explicitement considérés dans cette architecture de référence, les évaluations de sûreté font l'hypothèse qu'ils sont mis en dépôt dans une galerie unique. La superficie totale du dépôt considéré dans les évaluations de sûreté est de 0.224 km² ou de 1.17 km², selon que l'option de retraitement est conservée ou abandonnée.

Pour la modélisation, et dans la mesure où elles sont très longues par rapport à l'épaisseur de la couche argileuse, les galeries de dépôt sont assimilées à des cylindres de longueur infinie, ce qui permet d'effectuer les calculs de migration dans le champ proche et l'argile en deux dimensions, dans un plan perpendiculaire à celui des galeries. Le domaine à modéliser autour de chaque galerie peut en outre être limité en raison de l'existence de deux, et généralement de trois, plans de symétrie (fig. 4.6) : le plan horizontal qui passe par l'axe de la galerie considérée et qui résulte de ce que la migration par advection peut être négligée par rapport à la migration par diffusion, en raison de la faible conductivité hydraulique de l'argile et du gradient hydraulique limité sur l'épaisseur de la couche argileuse, le plan vertical qui passe par cet axe et, excepté pour les coques et embouts, le plan vertical situé à égale distance de deux galeries de dépôt identiques.

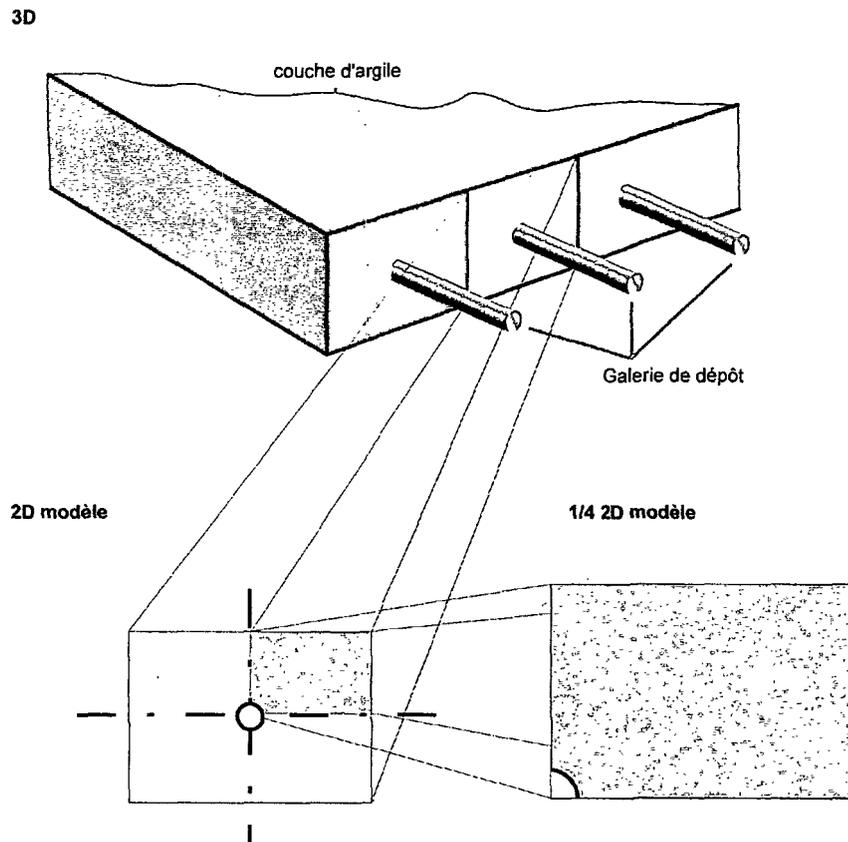


Figure 4.6 Configuration et simplifications considérées pour les calculs de migration dans le champ proche et la couche argileuse.

Dans le système de dépôt robuste, le modèle utilisé pour simuler la migration des radionucléides dans le champ proche et dans l'Argile de Boom est construit à partir de l'équation de diffusion et néglige la migration par advection et par dispersion. La couche d'Argile de Boom présente sous la zone nucléaire de Mol-Dessel est par ailleurs supposée homogène sur toute son épaisseur (90 mètres), ce qui permet de garder constants les principaux paramètres intervenant dans les calculs de migration, soit la porosité accessible à la diffusion η , le coefficient de diffusion D_p et les facteurs de retard R . L'épaisseur d'argile qui peut effectivement contribuer au retard et à l'étalement du relâchement des radionucléides n'est toutefois en première approximation que de 40 mètres, soit l'épaisseur d'argile située au-dessus ou au-dessous du dépôt, diminuée de l'épaisseur de la zone éventuellement perturbée par l'excavation ainsi que d'une épaisseur tenant compte du fait que le plan médian de l'installation de dépôt pourrait ne pas coïncider parfaitement avec celui de la couche d'argile. Le scellement des galeries et puits est supposé posséder les propriétés de migration de l'Argile de Boom (voir section 4.3.3 pour le scénario de mauvais scellement). Par ailleurs, la migration des radionucléides dans le champ proche étant conditionnée par leurs limites de solubilité et par la lenteur de la migration dans l'Argile de Boom, elle est le plus souvent modélisée avec la migration dans l'argile.

Bien que les incertitudes augmentent fortement à très long terme, les évaluations de sûreté rapportées dans le rapport SAFIR 2 supposent que la barrière géologique reste inchangée durant 100 millions d'années, ce qui permet de poursuivre les calculs de migration jusqu'à ce que les flux des différents radionucléides à l'interface entre l'Argile de Boom et l'aquifère du Néogène aient atteint leur maximum, ces pics de doses correspondant au risque maximum. Ces valeurs ne donnent bien entendu qu'une indication de l'ordre de grandeur des flux qui peuvent être attendus et doivent être complétées par d'autres indicateurs de sûreté et par d'autres arguments.

Enfin, les calculs de migration doivent s'appuyer sur des données et hypothèses précises quant aux termes sources concernés. Pour chacune des trois classes de déchets considérées, ils prennent en compte la durée de vie supposée des (sur)emballages étanches, la vitesse de corrosion des matrices de déchets et leur durée de vie, la limite de solubilité des radionucléides, les propriétés de migration du matériau de remblayage et, bien sûr, l'inventaire quantitatif le plus défavorable (table 4.4). Pour les déchets vitrifiés et les coques et embouts, l'inventaire le plus défavorable est celui qui correspond à la poursuite de l'option de retraitement, soit 3920 et 6410 conteneurs de déchets respectivement et, pour les combustibles usés, c'est celui qui correspond à l'abandon de l'option de retraitement, soit 4160 tU et environ 70 tHMox. Cet inventaire établi en 1997 et utilisé pour les évaluations de sûreté est pratiquement identique à l'inventaire le plus récent, daté de 1999 (table 3.2 ; table 3.3 pour les inventaires radiologiques). Pour les calculs des flux d'activité à l'interface entre l'Argile de Boom et l'aquifère du Néogène, les inventaires sont toutefois divisés par deux en raison de l'existence du plan de symétrie horizontal dû au fait que la migration dans l'Argile de Boom se fait essentiellement par diffusion.

Pour éviter de devoir effectuer des calculs de migration détaillés pour tous les radionucléides repris dans les inventaires radiologiques, on sélectionne les radionucléides qui ont une durée de vie suffisante ou qui migrent suffisamment vite pour atteindre l'aquifère du Néogène. Pour les simulations de la migration des produits d'activation et de fission, la liste des radionucléides qui répondent aux critères de sélection est la suivante : ^{14}C , ^{36}Cl , ^{59}Ni , ^{79}Se , ^{93}Zr , ^{94}Nb , ^{99}Tc , ^{107}Pd , ^{126}Sn , ^{129}I , ^{135}Cs et ^{147}Sm . Par ailleurs, les actinides les plus lourds (Cm, Am et Pu) étant fortement retardés par l'argile et la plupart de leurs isotopes ayant une durée de vie relativement courte, ils ne doivent généralement pas être considérés pour les simulations. Les chaînes de décroissance considérées dans les calculs se ramènent alors aux chaînes suivantes :

- $^{248}\text{Cm} \rightarrow ^{244}\text{Pu} \rightarrow ^{236}\text{U} \rightarrow ^{232}\text{Th}$
- $^{237}\text{Np} \rightarrow ^{233}\text{U} \rightarrow ^{229}\text{Th}$
- $^{242}\text{Pu} \rightarrow ^{238}\text{U} \rightarrow ^{234}\text{U} \rightarrow ^{230}\text{Th} \rightarrow ^{226}\text{Ra}$
- $^{235}\text{U} \rightarrow ^{231}\text{Pa}$.

Les radionucléides mères non considérés d'un point de vue radiologique sont toutefois pris en compte pour les calculs de solubilité des radionucléides au niveau du champ proche.

Table 4.4 Principales caractéristiques des termes sources utilisées dans les calculs de migration dans le champ proche et l'Argile de Boom.

	Déchets vitrifiés	Combustibles usés	Coques et embouts
Inventaire	3920 conteneurs, soit 420 conteneurs + 3500 si poursuite du retraitement	4 160 tU et environ 70 tHMMOX, soit l'inventaire en cas d'arrêt du retraitement	6 410 conteneurs, soit 820 conteneurs + 5 590 si poursuite du retraitement
(Sur)emballage étanche : durée de vie	300 ans	2 000 ans	(pas de suremballage)
Terme source : modèles	dissolution à vitesse constante de la matrice durant sa durée de vie considérée : référence = 72 000 ans variante 1 = 20 000 ans (limite inférieure) variante 2 = 10^6 ans (limite supérieure) variante 3 = dissolution instantanée de la matrice dès qu'elle entre en contact avec l'eau	1. dissolution immédiate d'une partie des radionucléides puis dissolution à vitesse constante de la matrice, durant un million d'années, et des coques et embouts, durant 1 000 ans 2. modèle d'auto-oxydation alpha : comme 1, mais dissolution de la matrice influencée par l'oxydation, due à la radiolyse alpha, de l'oxyde d'uranium quand il est placé en contact avec de l'eau en milieu réducteur	dissolution immédiate des radionucléides, seulement limitée par leur solubilité (pas de matrice de conditionnement)
Matériau de remblayage	mélange de 60 % d'argile FoCa, 35 % de sable et 5 % de graphite : contribution possible au confinement largement négligée en prenant, de façon arbitraire mais conservative, $D_p \text{ remblayage} = 5 \text{ à } 10 \times D_p \text{ argile},$ $\eta_{\text{remblayage}} = \eta_{\text{argile}},$ et, pour tous les radionucléides, $R_{\text{remblayage}} = R_{\text{argile}}.$		béton : contribution possible au confinement négligée en prenant, de façon très conservative, $D_p \text{ remblayage} = 10 \times D_p \text{ argile},$ et, pour tous les radionucléides, $R = 1.$

Déchets vitrifiés La durée de vie exacte des matrices de verre, et donc la valeur de l'incertitude, éventuellement élevée, qui l'entoure, n'a pratiquement pas d'influence sur la performance globale du système de dépôt, ce qui constitue un élément majeur de robustesse. Ainsi, dans le cas de ^{129}I , un radionucléide de très longue durée de vie (16 millions d'années) non retardé dans l'Argile de Boom, la durée de vie de la matrice n'a pratiquement pas d'influence sur la valeur maximale du flux de radionucléides qui atteint l'aquifère du Néogène et n'a qu'une faible influence sur le moment où il se produit, pour autant qu'elle soit inférieure à 100 000 ans (fig. 4.7). Quant aux radionucléides retardés (^{93}Zr , ^{99}Tc , ^{107}Pd et ^{135}Cs), la durée de vie de la matrice n'a d'influence notable ni sur la valeur du pic de flux, ni sur le moment où il se produit.

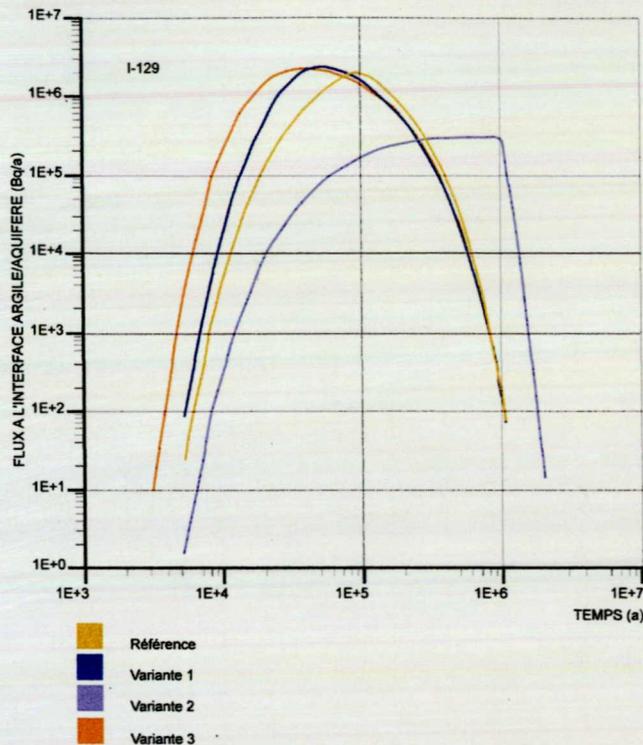


Figure 4.7 Flux d' ^{129}I à l'interface entre l'Argile de Boom et l'aquifère du Néogène dû aux déchets vitrifiés.

L'image globale de l'évolution attendue de l'impact radiologique des déchets vitrifiés montre deux pics : le premier, qui est aussi le plus grand, est formé par les produits d'activation et de fission ; le second est dû aux actinides (fig. 4.8). Les principaux produits d'activation et de fission sont, par ordre d'importance décroissante, le ^{79}Se , le ^{99}Tc , l' ^{129}I , le ^{107}Pd , le ^{126}Sn et le ^{93}Zr (fig. 4.9). L'évolution du flux de ^{99}Tc montre clairement l'influence de la limite de solubilité : la valeur du pic de flux à l'interface entre l'Argile de Boom et l'aquifère du Néogène, qui est d'environ 10^7 Bq par an et se produit après environ 200 000 ans, reste sensiblement constante jusqu'à 2 millions d'années, après quoi le ^{99}Tc disparaît par décroissance radioactive. Les flux de ^{79}Se et de ^{107}Pd sont également influencés par les limites de solubilité de ces éléments. Le pic de flux maximum, celui du ^{79}Se , est d'environ $2 \cdot 10^7$ Bq par an et se produit après 150 000 à 200 000 ans. Quant à la contribution des actinides, elle provient principalement de la chaîne $^{237}\text{Np} \rightarrow ^{233}\text{U} \rightarrow ^{229}\text{Th}$ (fig. 4.10). Ce n'est par ailleurs que pour cette chaîne qu'apparaît une augmentation significative des pics de flux si les évaluations prennent en compte la fraction organique mobile. Dans ce cas, le pic maximum est celui de l' ^{233}U et vaut environ $2 \cdot 10^4$ Bq par an, contre environ $5 \cdot 10^3$ Bq par an autrement. Tous deux apparaissent après environ 15 millions d'années, les radionucléides ne commençant à atteindre l'aquifère du Néogène qu'après environ 100 000 ans dans le premier cas et un million d'années dans le second. La fraction organique mobile n'a par conséquent aucune influence significative sur la capacité de confinement de la barrière géologique.

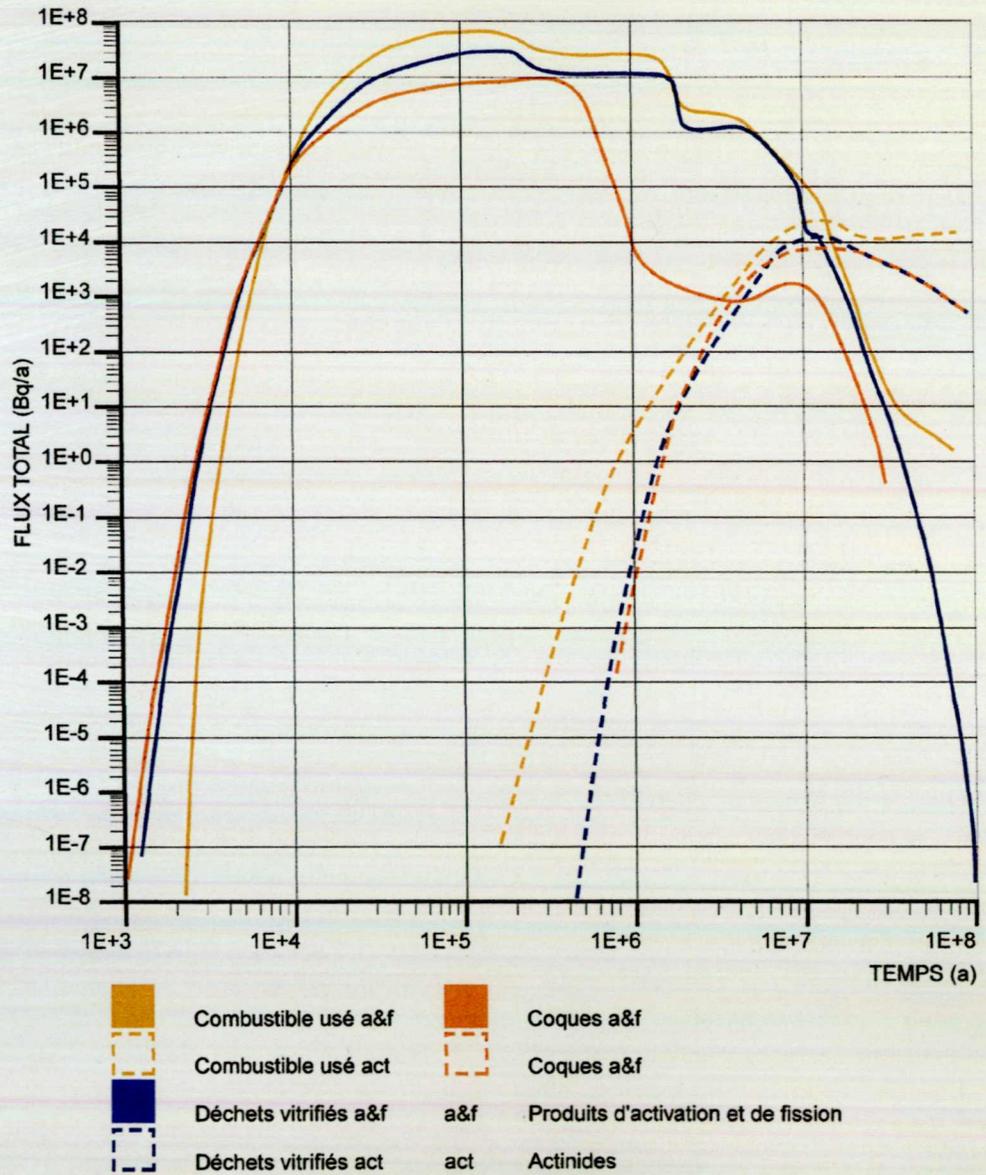


Figure 4.8 Flux d'activité à l'interface entre l'Argile de Boom et l'aquifère du Néogène dû aux déchets vitrifiés, aux combustibles usés et aux coques et embouts.

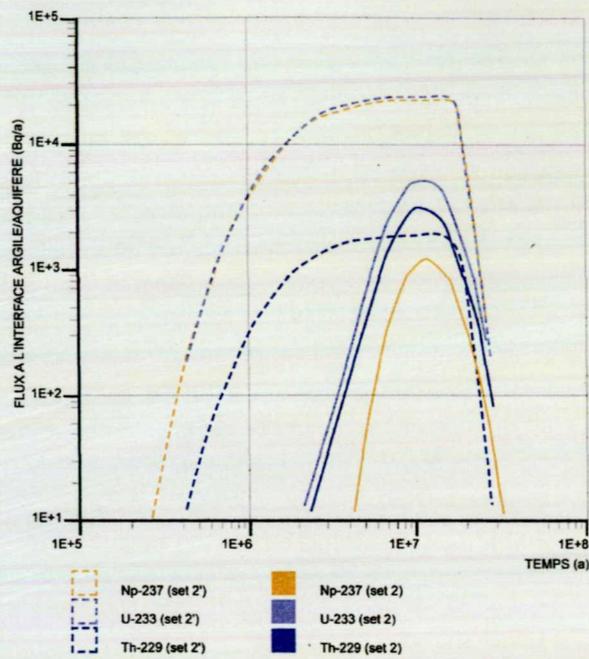


Figure 4.9 Flux d'activité à l'interface entre l'Argile de Boom et l'aquifère du Néogène des produits d'activation et de fission contenus dans les déchets vitrifiés.

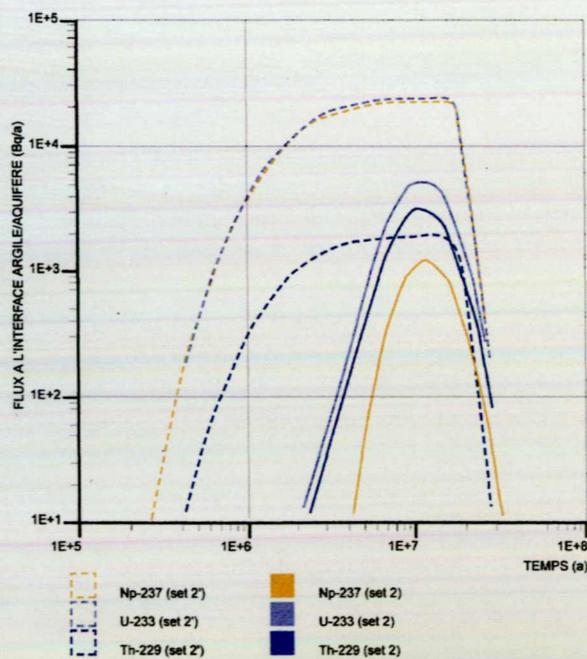


Figure 4.10 Flux d'activité à l'interface entre l'Argile de Boom et l'aquifère du Néogène des actinides de la chaîne $^{237}\text{Np} \rightarrow ^{233}\text{U} \rightarrow ^{229}\text{Th}$ contenus dans les déchets vitrifiés.

Combustibles usés Les calculs de la migration des radionucléides relâchés par les combustibles usés ont essentiellement été effectués dans le cadre du projet SPA (*Spent Fuel Performance Assessment*) de la Commission européenne. La comparaison des flux de produits d'activation et de fission calculés avec les deux modèles du terme source (table 4.4) indique des flux intervenant à peu près au même moment, mais qui sont jusqu'à deux à trois fois plus élevés avec le modèle d'auto-oxydation alpha, qui est donc celui qui est utilisé pour les calculs. Les principaux *produits d'activation* et de *fission* sont le ^{79}Se , le ^{99}Tc , le ^{36}Cl , ^{129}I , le ^{107}Pd et le ^{14}C . Dans le cas représentatif du calcul du flux associé aux 1980 tonnes d'oxyde d'uranium possédant un taux de combustion moyen de $55 \text{ GWj}\cdot\text{tHM}^{-1}$ (1980 tuOX-55), le pic de flux maximum est celui du ^{79}Se . Il vaut environ $2 \cdot 10^7 \text{ Bq}$ par an et se produit après 160 000 ans (fig. 4.11). L'effet de la limite de solubilité est clairement visible pour le ^{99}Tc , le ^{79}Se et le ^{107}Pd , comme l'est la présence d' ^{129}I dans différents composants des combustibles. La contribution principale des *actinides* au flux d'activité est fournie par ^{233}U , avec un flux maximum d'environ $2 \cdot 10^4 \text{ Bq}$ par an si la fraction organique mobile est prise en compte et d'environ $7 \cdot 10^3 \text{ Bq}$ par an sinon (fig. 4.12). Les deux pics se produisent après environ 10 millions d'années, les radionucléides ne commençant à atteindre l'aquifère du Néogène qu'après environ 100 000 ans dans le premier cas et un million d'années dans le second. L'ampleur et le moment des maxima des flux d'activité sont à peu près équivalents à ceux calculés pour les déchets vitrifiés (fig. 4.8).

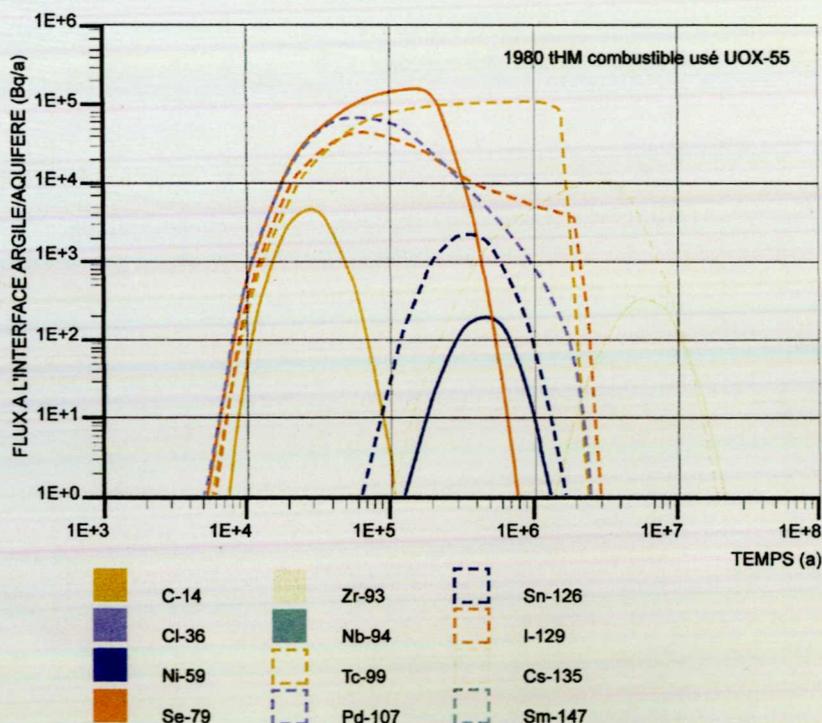


Figure 4.11 Flux d'activité à l'interface entre l'Argile de Boom et l'aquifère du Néogène des produits d'activation et de fission contenus dans les combustibles usés (1980 tuOX-55), calculé avec le modèle d'auto-oxydation alpha.

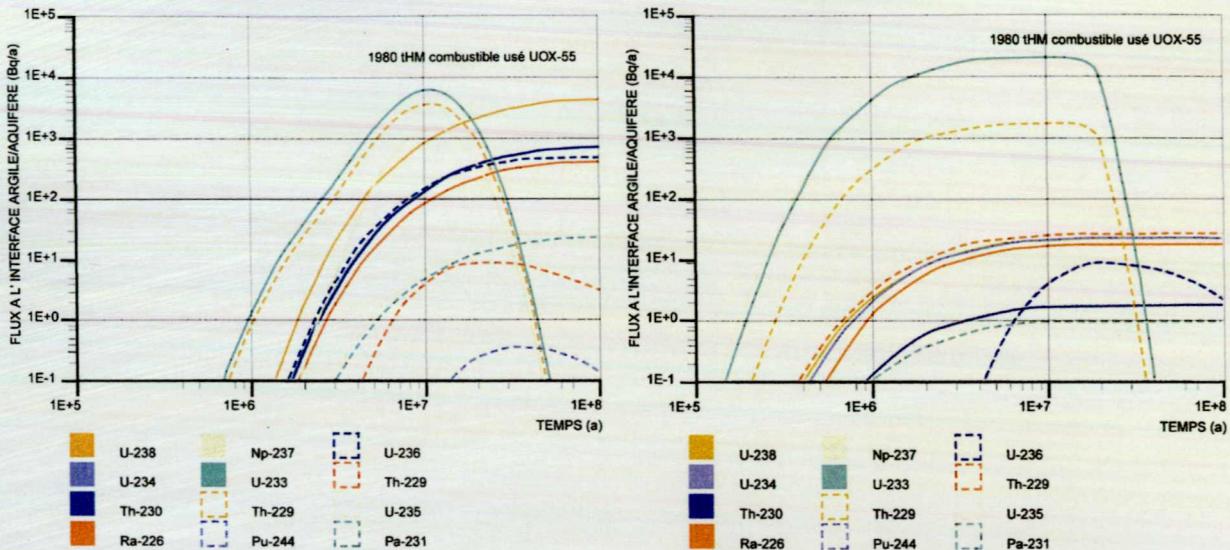


Figure 4.12 Flux d'activité à l'interface entre l'Argile de Boom et l'aquifère du Néogène des actinides de la chaîne $^{237}\text{Np} \rightarrow ^{233}\text{U} \rightarrow ^{229}\text{Th}$ contenus dans les combustibles usés (1980 tuOX-55), calculé avec le modèle d'auto-oxydation alpha, respectivement sans (figure gauche) et avec la fraction organique mobile (figure droite) prise en compte.

Coques et embouts Les principaux produits d'activation et de fission des coques et embouts sont le ^{99}Tc , l' ^{129}I , le ^{79}Se , le ^{14}C et le ^{93}Zr . L'influence de la limite de solubilité ne se remarque clairement que pour le ^{99}Tc . Son pic de flux vaut environ $9 \cdot 10^6$ Bq par an et se produit après 430 000 ans (fig. 4.13). La durée après laquelle tout le ^{99}Tc est dissous est notablement plus courte que pour les déchets vitrifiés, à savoir 550 000 ans au lieu de 1.7 million d'années. Si les calculs ne tiennent pas compte de la fraction organique mobile, le flux maximum d'activité dû aux actinides est celui de l' ^{236}U (environ 3000 Bq par an après 12 millions d'années), tandis que c'est celui de l' ^{233}U (environ 2000 Bq par an après 3 millions d'années) sinon. Ce n'est que dans le cas de la chaîne $^{237}\text{Np} \rightarrow ^{233}\text{U} \rightarrow ^{229}\text{Th}$ qu'on constate une augmentation significative des pics de flux si les évaluations prennent en compte la fraction organique mobile, les radionucléides commençant dans ce cas à atteindre l'aquifère du Néogène après environ 100 000 ans, au lieu d'environ un million d'années autrement (fig. 4.14). L'aspect global du flux d'activité avec les deux pics est donc comparable à celui obtenu pour les déchets vitrifiés (fig. 4.8).

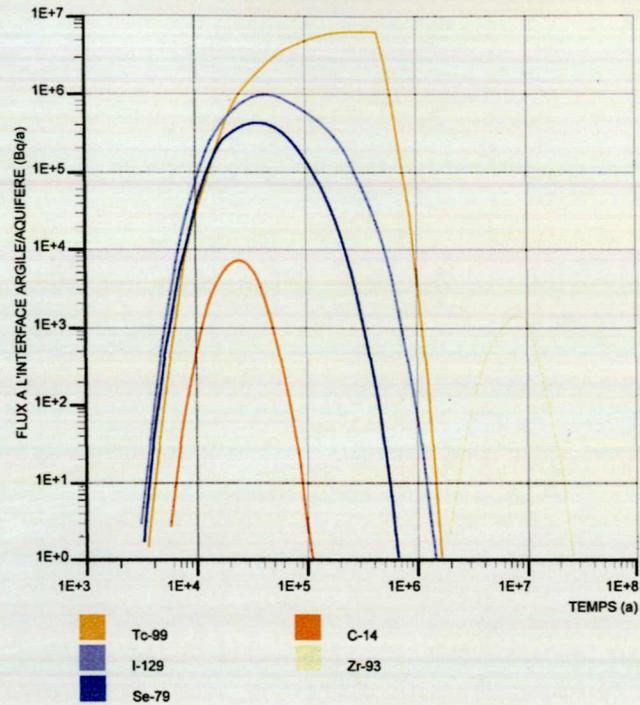


Figure 4.13 Flux d'activité à l'interface entre l'Argile de Boom et l'aquifère du Néogène des produits d'activation et de fission contenus dans les coques et embouts.

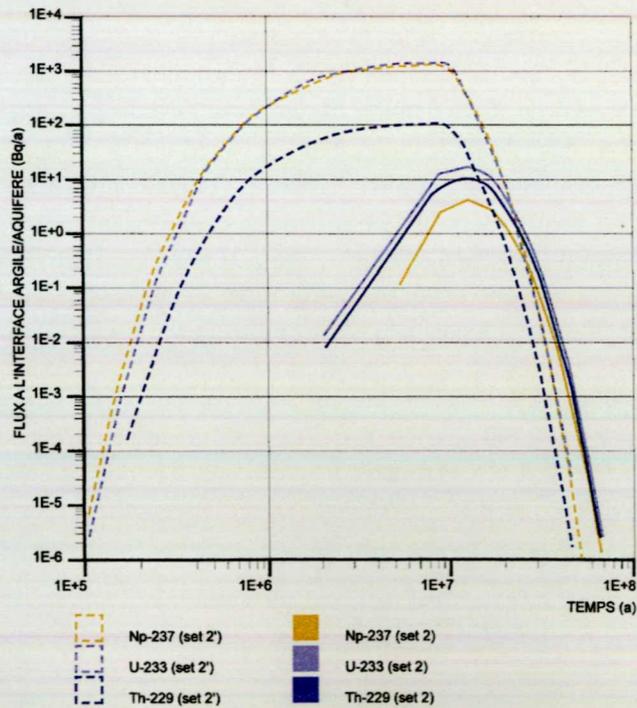


Figure 4.14 Flux d'activité à l'interface entre l'Argile de Boom et l'aquifère du Néogène des actinides de la chaîne $^{237}\text{Np} \rightarrow ^{233}\text{U} \rightarrow ^{229}\text{Th}$ contenus dans les coques et embouts.

Flux d'activité dans l'aquifère du Néogène

La contribution principale des aquifères au fonctionnement du système de dépôt est de permettre la dilution et la dispersion des radionucléides avant qu'ils n'atteignent la biosphère : l'impact radiologique est en effet inversement proportionnel au facteur de dilution, défini comme étant le rapport entre la concentration maximale dans l'aquifère ou dans les cours d'eau et le flux d'activité qui y arrive. Les calculs de migration dans l'aquifère calculent les concentrations en radionucléides dans l'eau d'un puits de captage et les flux d'activité vers les cours d'eau. Les caractéristiques et paramètres les plus importants de l'aquifère dans le système de dépôt robuste sont la conductivité hydraulique de ses différentes sous-couches, la vitesse de Darcy, les coefficients de dispersivité hydrodynamique et son épaisseur.

Jusqu'à présent, la plupart des simulations de migration dans l'aquifère du Néogène font l'hypothèse que, comme l'Argile de Boom, l'hydrogéologie locale reste inchangée durant 100 millions d'années. En réalité, elle pourrait subir des modifications importantes dans quelques centaines d'années en raison des changements climatiques, changements qu'on peut essayer de prendre en compte jusqu'à environ 100 000 ans, en utilisant des prédictions basées sur la théorie orbitale de Milankovitch. L'alternance à plus long terme de périodes glaciaires et de périodes interglaciaires entraînera des incertitudes importantes et inévitables dans le comportement de l'aquifère du Néogène.

Les calculs de la migration des radionucléides dans l'aquifère du Néogène se basent sur le modèle hydrogéologique local, tridimensionnel (voir section 3.2.4.4), alors que les simulations rapportées dans le rapport SAFIR utilisaient des simulations uni- ou bidimensionnelles. Ils utilisent donc des valeurs des paramètres qui varient dans l'espace. Cette migration a été simulée en négligeant la sorption possible des radionucléides par les minéraux présents, l'effet de la sorption étant très probablement négligeable par rapport à la rétention qui se produit déjà durant la migration dans l'Argile de Boom. Les radionucléides migrant de façon identique dans l'aquifère en l'absence de sorption, les calculs n'ont par ailleurs été effectués que pour l'¹²⁹I, en supposant un flux unitaire constant de 1 MBq par an depuis l'Argile de Boom, réparti de manière uniforme sur la superficie de l'installation de dépôt. La concentration maximale en activité ainsi calculée dans l'eau des Sables de Diest, qui sont les sables qui entrent le plus en ligne de compte pour le captage d'eau en raison de leur conductivité hydraulique élevée, est de 1.5 Bq·m⁻³. Elle correspond à un facteur de dilution apparent dans l'aquifère de 670 000 m³ par an.

Calculs de doses

La dose à laquelle un individu du groupe de référence peut être exposé via les différents récepteurs de la biosphère considérés s'obtient en multipliant la concentration en radionucléides dans l'eau captée dans un puits qui aboutit juste au-dessus de l'installation de dépôt ou en multipliant les flux d'activité vers les cours d'eau (principalement vers la Kleine Nete) par les facteurs de conversion dans la biosphère correspondants (voir section 3.7). Les calculs de dose font l'hypothèse d'une biosphère de référence, stable durant 100 millions d'années. Ils indiquent que toutes les doses dues à la Kleine Nete sont inférieures d'environ

deux ordres de grandeur à celles dues à un captage, lesquelles peuvent être résumées comme suit pour les trois classes de déchets considérées.

Déchets vitrifiés Les radionucléides les plus importants sont, par ordre d'importance décroissante, le ^{79}Se , l' ^{129}I , le ^{126}Sn et le ^{99}Tc . La dose la plus élevée est celle due au ^{79}Se : elle se produit après 200 000 ans et est d'environ $10\ \mu\text{Sv}$ par an (fig. 4.15). Elle est partiellement attribuable aux incertitudes relatives à la fois à son comportement à la migration dans l'Argile de Boom et à son facteur de conversion dans la biosphère. Par ailleurs, la dose totale dépasse $10^{-2}\ \mu\text{Sv}$ par an entre 7 000 ans et 1 million d'années et elle dépasse $1\ \mu\text{Sv}$ par an entre 20 000 et 350 000 ans. La dose maximale due aux actinides est de $3 \cdot 10^{-3}\ \mu\text{Sv}$ par an (fig. 4.16). Elle est principalement due au ^{229}Th et atteint son maximum après 13 millions d'années. D'autres actinides relativement importants sont le ^{226}Ra et le ^{231}Pa . La dose totale due aux actinides est supérieure à $10^{-4}\ \mu\text{Sv}$ par an entre 2 et 100 millions d'années.

Combustibles usés (calculs effectués pour 1980 tuox-55) Les radionucléides les plus importants sont le ^{79}Se , l' ^{129}I , le ^{36}Cl , le ^{126}Sn et le ^{99}Tc . La dose maximale est due au ^{79}Se : elle est de $7\ \mu\text{Sv}$ par an et se produit après 160 000 ans (fig. 4.17). La dose totale dépasse $10^{-2}\ \mu\text{Sv}$ par an durant la période comprise entre 9 000 ans et 2 millions d'années. La dose maximale calculée pour les actinides provient essentiellement du ^{229}Th (fig. 4.18). Elle est de $4 \cdot 10^{-3}\ \mu\text{Sv}$ par an et s'observe après 10 millions d'années. Un autre actinide relativement important est le ^{226}Ra . Enfin, le pic de dose pour l'ensemble des combustibles usés, qui est également dû au ^{79}Se (fig. 4.19), apparaît après 160 000 ans et vaut environ $20\ \mu\text{Sv}$ par an. Dans ce cas, la dose totale dépasse $10^{-2}\ \mu\text{Sv}$ par an durant la période comprise entre 8 000 ans et 3 millions d'années.

Coques et embouts Les radionucléides les plus importants sont le ^{79}Se , l' ^{129}I et le ^{99}Tc . La dose maximale, due au ^{79}Se , est d'environ $3 \cdot 10^{-1}\ \mu\text{Sv}$ par an et s'observe après 36 000 ans (fig. 4.20). La dose totale dépasse $10^{-2}\ \mu\text{Sv}$ par an durant la période comprise entre 7 000 et 300 000 ans. La dose maximale calculée pour les coques et embouts est donc 30 fois moindre que celle calculée pour les déchets vitrifiés et s'explique essentiellement par la plus faible quantité de ^{79}Se dans les coques et embouts. La dose maximale due aux actinides est de $2 \cdot 10^{-3}\ \mu\text{Sv}$ par an et provient essentiellement du ^{231}Pa et du ^{226}Ra . Le maximum s'observe après 13 millions d'années. Les actinides donnent des doses supérieures à $10^{-4}\ \mu\text{Sv}$ par an entre 4 et 100 millions d'années.

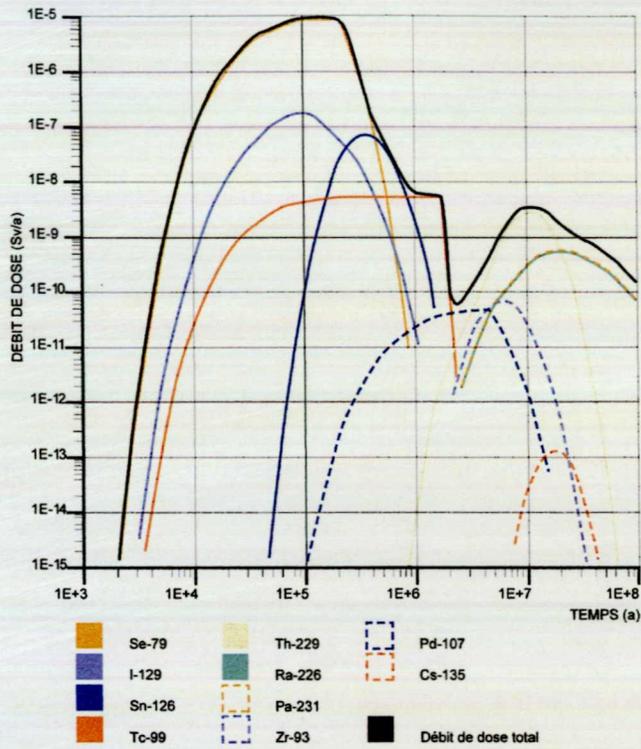


Figure 4.15 Débit de dose total par un puits de captage dû aux produits de fission et d'activation contenus dans les déchets vitrifiés.

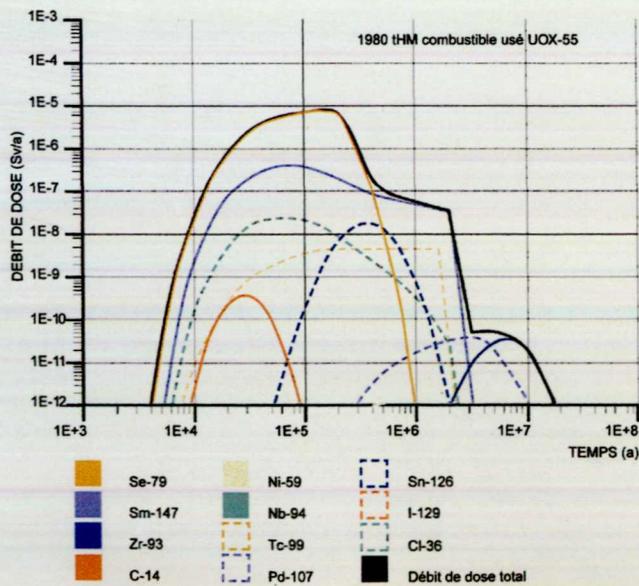


Figure 4.16 Débit de dose total par un puits de captage dû aux actinides contenus dans les déchets vitrifiés.

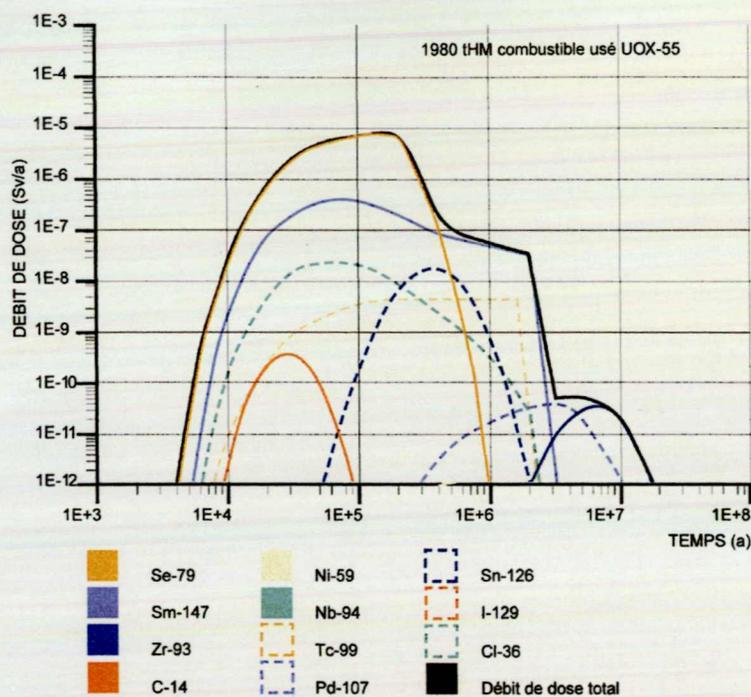


Figure 4.17 Débit de dose total par un puits de captage dû aux produits d'activation et de fission contenus dans 1980 TUOX-55.

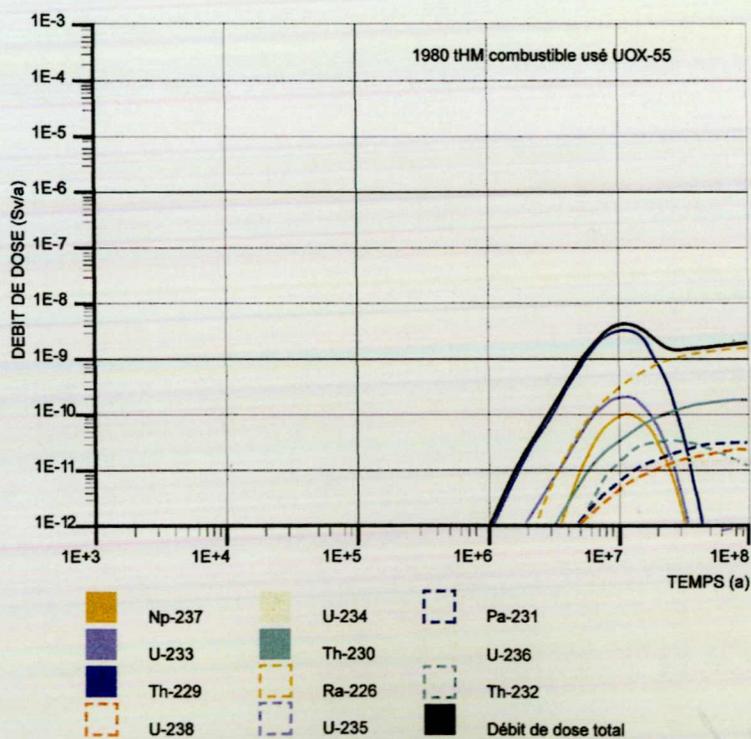


Figure 4.18 Débit de dose total par un puits de captage dû aux actinides contenus dans 1980 TUOX-55.

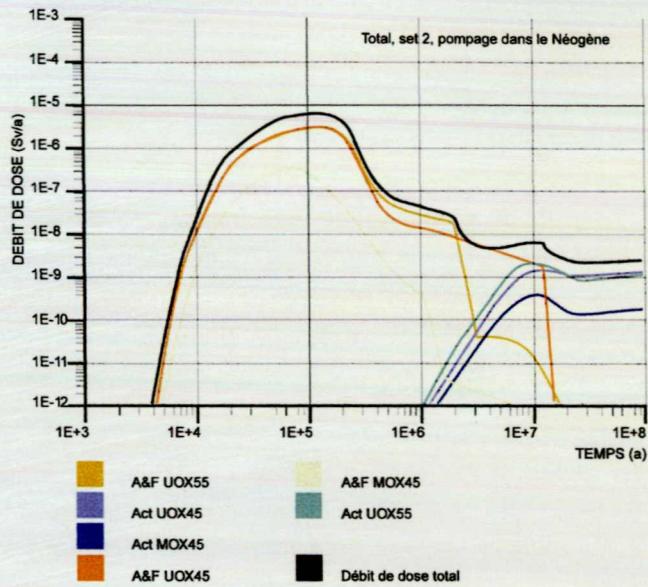


Figure 4.19 Débit de dose total par un puits de captage dû aux produits de fission et d'activation ainsi qu'aux actinides contenus dans l'ensemble des combustibles utilisés.

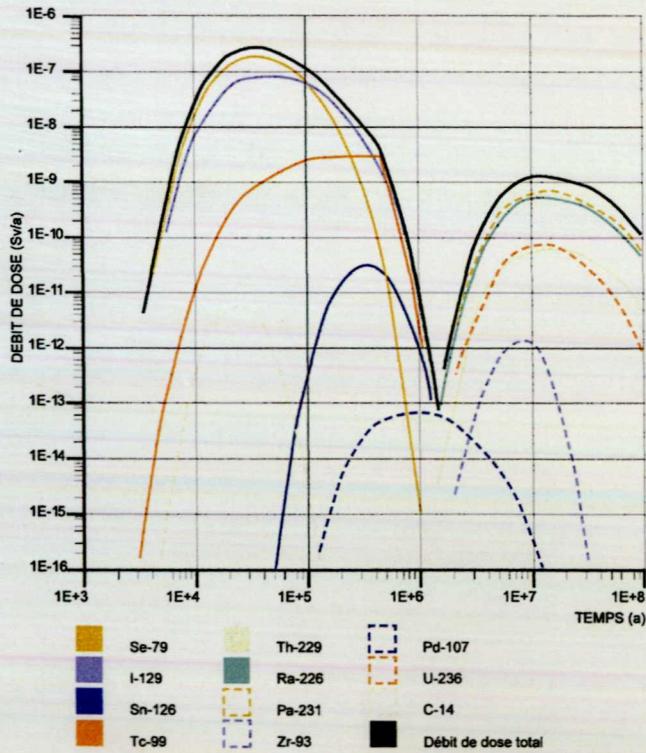


Figure 4.20 Débit de dose total par un puits de captage dû aux produits d'activation et de fission contenus dans les coques et embouts.

4.3.2.2 Calcul d'indicateurs de sûreté et de performance alternatifs

Trois indicateurs dont le calcul est pratiquement indépendant de l'évolution de l'environnement du système de dépôt ont été utilisés pour compléter les calculs de doses.

Fractions décriues et facteurs de confinement La comparaison de l'activité totale qui atteint l'aquifère du Néogène en 100 millions d'années avec la quantité initiale d'activité mise en dépôt permet de calculer la fraction décriue dans le système de dépôt même, c'est-à-dire le rapport entre la quantité de radionucléides qui disparaissent par décroissance radioactive à l'intérieur du système de dépôt et la quantité initiale d'activité mise en dépôt, et, à partir de là, d'évaluer la performance des barrières du système.

Dans le cas des déchets vitrifiés, à l'exception de quelques radionucléides de très longue durée de vie comme l' ^{129}I et le ^{107}Pd et de quelques radionucléides non retardés comme le ^{79}Se et le ^{99}Tc , seule une très faible partie de l'activité initiale atteint l'aquifère (fig. 4.21) :

- environ $2 \cdot 10^{10}$ Bq de produits d'activation et de fission pour une activité initiale totale de $7 \cdot 10^{19}$ Bq ;
- environ 10^7 Bq d'actinides (soit le contenu moyen en actinides de 0.2 m^3 de déchets radioactifs de catégorie A) pour une activité initiale totale d'environ $5 \cdot 10^{17}$ Bq (essentiellement l' ^{241}Am et le ^{244}Cm).

Le système de dépôt, avec ses fonctions de confinement physique et de retard et d'étalement du relâchement, forme donc un filtre extrêmement performant, la majeure partie de l'activité initialement mise en dépôt disparaissant avant d'avoir pu atteindre l'aquifère. Le facteur de confinement (rapport entre l'activité mise en dépôt et l'activité relâchée cumulée dans l'aquifère) est de $4 \cdot 10^9$ pour les produits de fission et d'activation et de $5 \cdot 10^{10}$ pour les actinides.

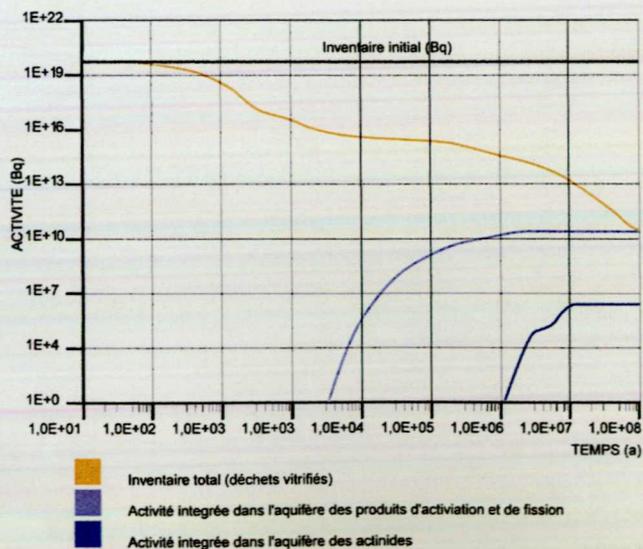


Figure 4.21 Activité cumulée qui atteint l'aquifère du Néogène due aux déchets vitrifiés.

Pour les radionucléides de très longue durée de vie toutefois, la fraction totale qui atteint la biosphère est élevée : 99 % pour l' ^{129}I , 94 % pour l' ^{238}U , 92 % pour l' ^{235}U , etc. La fonction de retard et d'étalement du relâchement fait néanmoins en sorte que ce relâchement soit très étalé dans le temps, si bien qu'un individu futur ne sera jamais exposé qu'à une fraction extrêmement minime de l'activité totale mise en dépôt. Ainsi, pour les déchets vitrifiés, le flux maximum annuel d' ^{129}I ($2 \cdot 10^6$ Bq par an) correspond à $3 \cdot 10^{-6}$ fois l'activité totale en ^{129}I mise en dépôt. Pour le ^{79}Se , le flux maximum annuel ($2 \cdot 10^7$ Bq par an) correspond à $3 \cdot 10^{-7}$ fois l'activité initiale en ^{79}Se .

Flux total d'activité à l'interface entre l'Argile de Boom et l'aquifère du Néogène Le flux maximum d'activité dû aux déchets vitrifiés, aux combustibles usés et aux coques et embouts à l'interface entre l'Argile de Boom et l'aquifère du Néogène est d'environ $2 \cdot 10^7$ Bq par an, soit moins de $100 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-2}$ par an compte tenu de ce que la superficie de l'architecture de dépôt considérée est de 0.224 km^2 pour un dépôt destiné aux déchets vitrifiés et de 1.17 km^2 pour un dépôt destiné aux combustibles usés.

Ce flux annuel est très faible, puisqu'il équivaut à l'activité alpha de l'uranium, du thorium et du radium naturellement présents dans une couche d'Argile de Boom de seulement 0.1 mm d'épaisseur environ, l'activité moyenne de ces isotopes étant d'environ 360 Bq par kilo, soit encore $7 \cdot 10^5 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$. En outre, le flux de radionucléides qui quitte l'Argile de Boom et aboutit dans l'aquifère du Néogène n'ajoute chaque année que 0.0008 % à l'activité naturelle déjà présente dans les Sables de Berchem, une sous-couche de l'aquifère du Néogène d'environ 20 mètres d'épaisseur située juste au-dessus de l'Argile de Boom et dans laquelle l'activité naturelle en uranium, thorium et radium est élevée (environ 400 Bq par kilo, soit environ $6 \cdot 10^5 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$). Enfin, dans le cas des déchets vitrifiés, l'activité totale cumulée qui atteint l'aquifère du Néogène, intégrée sur une période de 100 millions d'années (fig. 4.21) correspond, pour les produits d'activation et de fission, à l'activité alpha déjà naturellement présente dans une couche d'environ 10 cm de Sables de Berchem et, pour les actinides, à une couche d'environ 0.1 mm.

Inventaire total en uranium La comparaison de l'inventaire initial total en uranium dans les déchets vitrifiés et dans les combustibles usés à la quantité d'activité alpha déjà naturellement présente dans l'Argile de Boom autour de l'installation de dépôt (environ $7 \cdot 10^5 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$) constitue un troisième indicateur alternatif de l'impact radiologique potentiel à très long terme d'une telle installation, impact qui est dû aux isotopes de l'uranium et à leurs filles, et notamment au radium, au thorium et au protactinium. Pour l'inventaire initial total d'environ $5 \cdot 10^{12}$ Bq U dans les déchets vitrifiés et d'environ $2 \cdot 10^{14}$ Bq U dans les combustibles usés, la quantité d'isotopes de l'uranium qui migrent dans l'Argile de Boom depuis l'installation de dépôt est en réalité proche de la quantité d'activité alpha déjà naturellement présente dans le volume d'argile qui entoure l'installation de dépôt. Plus précisément, pour les déchets vitrifiés, le volume d'argile équivalent posséderait une superficie de 0.25 km^2 pour une épaisseur de 80 mètres, soit l'épaisseur effective de la couche d'Argile de Boom, et, pour les combustibles usés, il posséderait une superficie de 4 km^2 pour 80 mètres d'épaisseur.

4.3.3 L'évaluation des scénarios d'évolution altérée

Contrairement au rapport SAFIR, qui ne présentait de résultats que pour un seul scénario d'évolution altérée, le scénario d'activation de faille, le rapport SAFIR 2 présente une première analyse, essentiellement qualitative, des conséquences de six des scénarios d'évolution altérée identifiés dans l'étude des scénarios (voir section 4.2.2.2).

- La probabilité d'occurrence du *scénario de forage d'exploitation* est faible en raison de la faible conductivité hydraulique de l'aquifère du Sous-Rupélien et du fait que la composition chimique de l'eau dans cette couche la rend impropre à la consommation directe par l'homme. Si cette eau est malgré tout utilisée telle quelle comme eau potable et à des fins agricoles, comme dans le cas du scénario d'évolution normale, elle pourra donner lieu à une dose de quelques mSv par an à un individu du groupe de référence. La lenteur des mouvements d'eau dans cet aquifère et sa faible épaisseur (30 mètres) ne permettent en effet qu'une très faible dilution des radionucléides, de sorte que leurs concentrations peuvent être jusqu'à 1 000 fois plus élevées que celles dans l'aquifère sus-jacent du Néogène.
- Les calculs des conséquences du *scénario d'activation d'une faille*, effectués en utilisant, faute de mieux, des valeurs arbitraires pour les paramètres destinés à décrire la migration de l'eau et des radionucléides via la faille, indiquent que son impact radiologique est très faible et est du même ordre de grandeur que celui du scénario d'évolution normale, parce que seule une très faible fraction des radionucléides mis en dépôt peut prendre part à la migration accélérée par la faille. Sa probabilité d'occurrence pourrait a priori être drastiquement diminuée par le choix d'un site de dépôt exempt de faiblesses de structure géologique pré-existantes.
- Le scénario de *glaciation sévère* n'a pas encore fait l'objet d'évaluations quantitatives. Selon la théorie orbitale de Milankovitch, sa probabilité d'occurrence durant les premières dizaines de milliers d'années est toutefois faible : il ne devrait pas y avoir de périodes glaciaires plus sévères que les trois dernières du Quaternaire, dont aucune n'a conduit à ce que la calotte glaciaire recouvre la région de Mol-Dessel. Toutefois, il subsiste des incertitudes considérables dans les mécanismes secondaires qui déterminent le climat à l'échelle de quelques centaines de milliers d'années, comme les concentrations en CO₂ dans l'atmosphère et les courants marins. Ainsi, un déplacement du Gulf Stream durant une période glaciaire pourrait entraîner une extension beaucoup plus grande de la calotte glaciaire. Des calculs récents montrent toutefois qu'il ne devrait pas y avoir, dans les 130 000 prochaines années, d'ère glaciaire telle qu'il y aurait une extension importante de la calotte glaciaire. L'activité des déchets mis en dépôt aura alors fortement diminué, de sorte que l'impact d'un scénario de glaciation resterait vraisemblablement limité.
- Les analyses d'impact du *scénario de mauvais scellement* des galeries principales et des puits d'accès effectuées jusqu'à présent montrent que ce scénario ne devrait pas avoir de conséquences graves. La migration par advection dans les galeries principales mal scellées reste en effet extrêmement limitée, parce qu'il n'y arrive pour ainsi dire pas d'eau en raison de la très faible conductivité hydraulique de l'Argile de Boom. Sa probabilité d'occurrence pourrait a priori être fortement réduite moyennant mise en place d'une

culture de sûreté et d'une politique d'assurance de la qualité stricte durant l'étape de fermeture du dépôt.

- Le scénario de *transport par les gaz* étudie le couplage gaz-écoulement d'eau en cas d'apparition d'une phase gazeuse et analyse son influence sur l'impact radiologique. Les évaluations déjà effectuées indiquent que les déchets vitrifiés, les combustibles usés et probablement aussi les coques et embouts ne causent aucun problème notable de production de gaz, essentiellement en raison de l'utilisation d'aciers inoxydables pour les emballages. Par contre, pour certaines autres classes de déchets contenant une grande quantité d'acier au carbone, on ne peut exclure la formation de poches de gaz dans le champ proche, expulsant l'eau à travers l'argile, voire même la formation de voies de migration préférentielles dans l'argile. Le sous-scénario qui considère l'expulsion hors du champ proche d'eau dans laquelle sont dissous des radionucléides a des conséquences limitées, puisque dans le cas le plus défavorable, le flux maximum de radionucléides vers l'aquifère n'est augmenté que d'un facteur 10. Le sous-scénario peu réaliste qui considère la création dans l'argile d'une voie de migration permettant l'écoulement de l'eau et des gaz peut provoquer, pour un certain nombre de classes de déchets de la catégorie B, une augmentation par un facteur 100 environ de la migration dans la couche argileuse par rapport au scénario d'évolution normale. Mais même dans ce cas, le flux des radionucléides vers l'aquifère est inférieur à celui lié aux déchets vitrifiés et aux combustibles usés. Pour les déchets de catégorie B, le développement de l'architecture de dépôt doit donc tenir compte de la formation possible de gaz, de sorte que les gaz formés puissent s'échapper sans abîmer les barrières du système de dépôt et sans que sa capacité de confinement soit diminuée de façon significative. Tous les efforts raisonnables doivent par ailleurs être faits pour réduire les sources de gaz, par exemple éviter l'emploi d'acier au carbone pour le conditionnement des déchets. Enfin, l'évaluation du scénario de transport par les gaz requiert une meilleure connaissance des différents paramètres et processus impliqués, et notamment des coefficients de diffusion des principaux gaz formés et des caractéristiques hydrauliques des zones de fissuration.
- La deuxième variante du *scénario de forage d'exploration*, celle qui suppose que le forage effectué à travers l'installation de dépôt n'est pas remblayé, et qui évalue donc la robustesse du système de dépôt en cas de perturbation des barrières par une intrusion, n'aura qu'un impact fort limité, car le forage se refermera progressivement par convergence en raison de la plasticité de l'Argile de Boom. Une question est de savoir si sa probabilité d'occurrence pourrait être diminuée significativement si le dépôt était construit plus profondément.

Deux scénarios d'évolution altérée n'ont par contre pas encore été étudiés.

- Le *scénario d'effet de serre*, qui influence principalement la biosphère et, dans une moindre mesure, l'hydrogéologie, pourrait réduire fortement les diminutions des températures attendues sur base de la théorie orbitale de Milankovitch.
- Le *scénario de défaillance prématurée d'une barrière ouvragée*, dont l'impact radiologique sera vraisemblablement moins sévère que ce que l'on pourrait craindre parce qu'une grande partie de la couche d'argile reste intacte, doit toutefois être évalué de près, parce

que les processus de migration sous un gradient de température sont différents de ceux considérés dans le scénario d'évolution normale.

Enfin, la première variante du *scénario de forage d'exploration*, autrement dit le scénario d'intrusion humaine, n'est pas considérée dans les évaluations de sûreté, conformément du reste au consensus international quant à sa non-pertinence. En effet, elle est très peu probable au vu des procédures de prospection actuelles, il est impossible d'estimer sa probabilité et ses conséquences sont indépendantes de l'architecture du dépôt et du site choisi. Bien entendu, il sera nécessaire d'établir le dépôt en dehors des zones, qui possèdent des ressources naturelles.

4.3.4 Résultats et considérations complémentaires

L'ensemble des travaux effectués dans le cadre de l'évaluation du scénario d'évolution normale ainsi que les premières évaluations, essentiellement qualitatives, de scénarios d'évolution altérée ont conduit à certains résultats et considérations qui complètent les calculs de doses et d'indicateurs alternatifs.

Etablissement de la confiance dans les modèles de migration L'excellente correspondance entre les concentrations en radionucléides calculées à l'avance à partir des résultats de laboratoire et les concentrations mesurées in situ à grande échelle supporte la validité du modèle de migration dans l'Argile de Boom utilisé pour les radionucléides non retardés. La migration très lente des radionucléides retardés, et principalement des actinides, qui conduit à des temps de migration dans l'Argile de Boom de l'ordre de 100 000 ans à un million d'années, est quant à elle confirmée par la constatation que les isotopes naturels du thorium et de l'uranium qui y sont présents sont restés quasiment immobiles depuis le dépôt de l'argile.

Comparaison avec les résultats des évaluations de sûreté antérieures

- *Produits de fission et d'activation* Des hypothèses beaucoup plus conservatives que par le passé ont amené les évaluations de sûreté les plus récentes à révéler l'importance de deux radionucléides qui n'étaient pas considérés dans les évaluations de sûreté précédentes ou qui ne donnaient pas lieu à des doses importantes : d'une part, le ^{36}Cl , un produit d'activation qui provient de l'irradiation d'impuretés de chlore présentes dans les combustibles et dans les gaines et dont l'inventaire, qui n'est pas encore bien connu, était sous-estimé ; d'autre part, le ^{79}Se , dont la migration dans l'Argile de Boom n'est pas encore suffisamment bien comprise, de sorte que les évaluations de sûreté récentes ont supposé par prudence l'absence de sorption, et dont les coefficients de transfert dans la biosphère sont souvent estimés de façon conservative. Sa solubilité et éventuellement sa rétention deviennent dès lors des paramètres qui influencent fortement son flux vers l'aquifère et qui doivent donc être connus avec précision, pour autant qu'il serait confirmé que le Se ne sorbe pas sur l'Argile de Boom.
- *Actinides* Les doses les plus élevées restent attribuables aux radionucléides filles de l'uranium, soit le ^{229}Th et le ^{226}Ra .

- ¹²⁹I / L'activité en ¹²⁹I considérée pour les déchets vitrifiés étant apparue fortement surestimée, l'impact radiologique de l'¹²⁹I contenu dans ces déchets est également fortement surestimé, dans les mêmes proportions.

Influence de la valeur de la durée de vie utilisée pour le ⁷⁹Se Alors que les calculs effectués dans le cadre des évaluations de sûreté belges utilisent une durée de vie de 65 000 ans pour le ⁷⁹Se, différentes sources étrangères citent depuis peu des valeurs beaucoup plus élevées pour cette durée de vie. Une première évaluation a donc été faite de l'impact sur les doses calculées d'une durée de vie plus vraisemblable de 650 000 ans. Cette évaluation indique une diminution par 5 des doses maximales attribuables au sélénium, soit une dose maximale d'environ 2 µSv par an pour les déchets vitrifiés et d'environ 1.5 µSv par an pour les combustibles usés. La durée d'exposition au sélénium est par contre allongée.

Comparaison de l'impact radiologique des deux scénarios de retraitement Les doses maximales engendrées par les deux scénarios de retraitement se situent au moins un ordre de grandeur en dessous des contraintes de dose, qui varient de 0.1 à 0.3 mSv par an. Les doses maximales sont en effet de 10 µSv par an pour le scénario avec retraitement et de 20 µSv par an pour le scénario de mise en dépôt direct (fig. 4.22). Pour les 500 000 premières années, les différences entre les doses totales calculées pour les deux scénarios sont très faibles, tout au plus d'un facteur 2. Dans les deux cas, la dose maximale est surtout attribuable au ⁷⁹Se. Après 500 000 ans, des différences plus importantes apparaissent entre les doses calculées pour les deux scénarios, mais les doses sont alors inférieures de 2 à 3 ordres de grandeur aux doses maximales. A très long terme, vers 20 millions d'années, la différence entre les doses calculées pour les deux scénarios est d'environ un ordre de grandeur, en raison de la quantité sensiblement plus élevée d'actinides mis en dépôt dans le scénario de mise en dépôt direct.

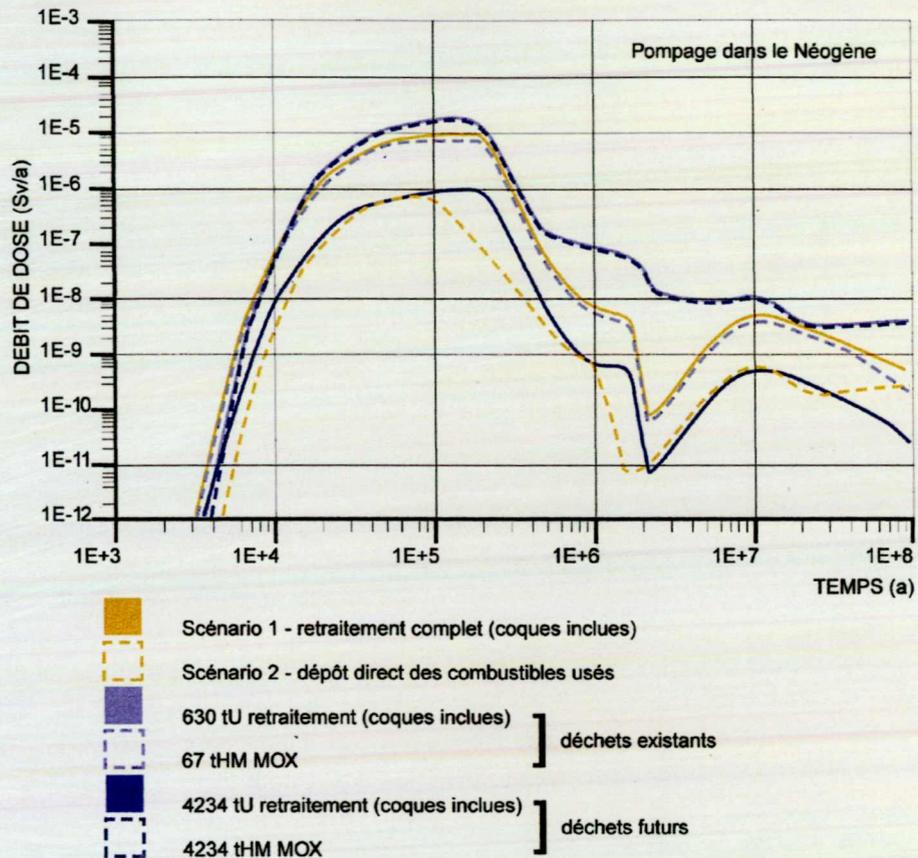


Figure 4.22 Evolution des débits de dose totaux pour les deux scénarios de retraitement dans le cas du scénario d'évolution normale.

Influence de la complexation par la matière organique mobile Les évaluations préliminaires effectuées indiquent que l'augmentation du flux maximal de radionucléides qui atteignent l'aquifère du Néogène suite à la complexation d'actinides par la matière organique mobile est négligeable pour les trois classes de déchets considérées. Quelques actinides peuvent atteindre l'aquifère en quantités négligeables et plus rapidement, c'est-à-dire après environ 10 000 ans, qu'estimé sur base de la sorption observée pour une grande partie d'entre eux, mais après 10 000 ans, seuls des produits d'activation et de fission non retardés comme I^{129} et le Se^{79} l'atteignent en quantités notablement plus importantes.

Importance des incertitudes relatives aux flux et aux doses suite aux incertitudes relatives aux valeurs des paramètres caractéristiques du système de dépôt robuste

- *Incertitudes relatives aux inventaires en radionucléides* Malgré l'utilisation d'hypothèses conservatives, l'impact radiologique des radionucléides est, pour la grande majorité d'entre eux, inférieur de plusieurs ordres de grandeur à la contrainte de dose, de sorte que les incertitudes relatives aux inventaires ne sont pas déterminantes. Il n'y a que pour les radionucléides non retardés I^{129} , Cl^{36} et Se^{79} que les inventaires doivent être précis.

- *Incertitudes relatives à la durée de vie des (sur)emballages étanches* Ces incertitudes ne sont pas déterminantes, pour autant que l'Argile de Boom remplisse son rôle de barrière correctement, dans la mesure où les (sur)emballages ne permettent de postposer significativement les flux de radionucléides non retardés à l'interface entre l'Argile de Boom et l'aquifère du Néogène que si leur durée de vie est supérieure à 100 000 ans et qu'ils ne permettent pas de réduire significativement les flux. Les (sur)emballages doivent néanmoins assurer leur fonction de confinement physique durant la phase thermique du dépôt.
- *Incertitudes relatives à la vitesse de dégradation des matrices de verre, d'UO₂ et d'UO₂-PuO₂* Ces incertitudes n'ont pour ainsi dire pas d'influence sur les flux en raison des bonnes performances de la barrière argileuse, certainement dans le cas des radionucléides de longue durée de vie, des radionucléides retardés et des radionucléides ayant une faible limite de solubilité. Ce n'est que si elles possèdent une durée de vie supérieure à 500 000 ans que les matrices de conditionnement ont une influence nette sur le flux des radionucléides non retardés qui quittent la couche argileuse. Elles peuvent par ailleurs fournir une contribution plus importante pour des radionucléides de relativement courte durée de vie et non retardés comme le ¹⁴C. Elles ne contribuent pas au confinement des actinides, parce que la faible solubilité de ceux-ci est déjà à l'origine de leur relâchement très lent du champ proche.
- *Incertitudes relatives aux paramètres de migration* L'importance de ces incertitudes est très limitée pour les radionucléides non retardés en raison du fait que leurs paramètres déterminants sont les paramètres de migration, qui sont connus avec précision dans le cas du ³⁶Cl et de l'¹²⁹I ou qui ont été estimés très prudemment dans le cas du ⁷⁹Se. (Les valeurs des paramètres de migration des radionucléides retardés, surtout celles des facteurs de retard, sont toutefois entachées d'incertitudes importantes.)
- *Incertitudes relatives à l'épaisseur effective de la barrière argileuse* Bien que l'épaisseur de la couche argileuse soit un des paramètres qui ont le plus d'influence sur le confinement, son impact reste relativement faible, et donc a fortiori aussi l'incertitude sur la valeur exacte de l'épaisseur. Pour une augmentation de 10 % de l'épaisseur de la barrière argileuse, soit une augmentation de près de 10 mètres, le flux maximum des radionucléides vers l'aquifère du Néogène diminue en effet en moyenne de 18 %.

Rôle des différentes barrières dans le fonctionnement global du système de dépôt La contribution des différentes barrières du système de dépôt et la contribution de son environnement à la sûreté globale du système peut être visualisée en calculant la quantité cumulée d'activité relâchée par chaque barrière pour des radionucléides représentatifs. Les calculs effectués pour le ¹²⁹I et l'¹²⁹I, qui sont respectivement un radionucléide retardé avec une durée de vie de 100 000 ans et un radionucléide non retardé avec une durée de vie de 16 millions d'années, montrent clairement le rôle dominant de la barrière géologique (figs. 4.23 et 4.24).

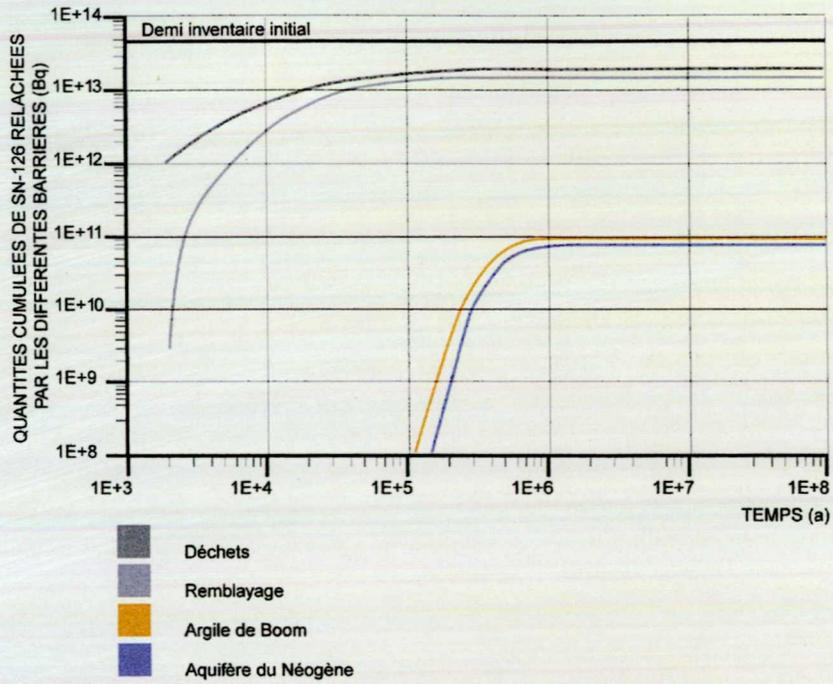


Figure 4.23 Quantités cumulees de ^{126}Sn relachees par les differentes barrieres du systeme de depot et par son environnement suite au depot de 1980 TUOX-55.

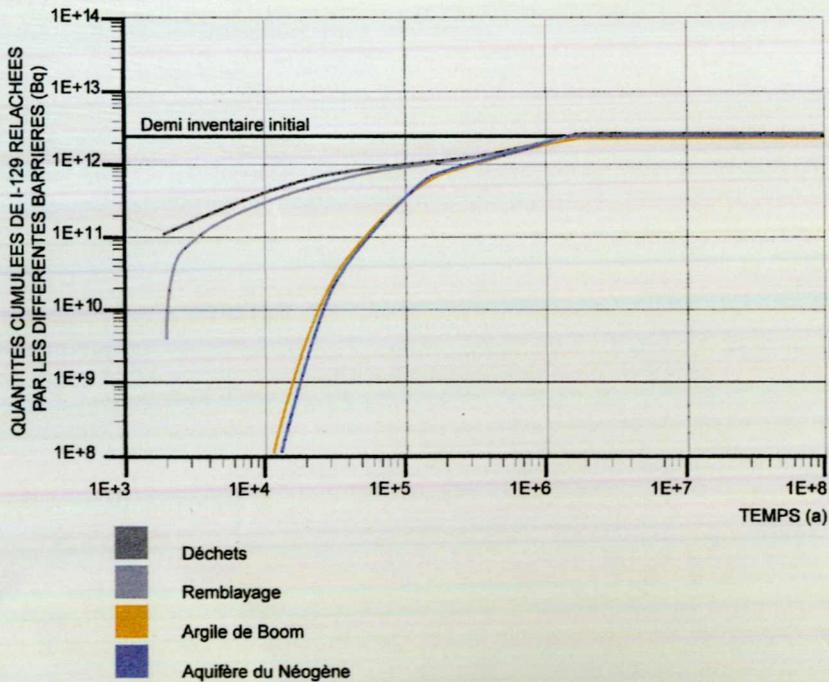


Figure 4.24 Quantités cumulees de ^{129}I relachees par les differentes barrieres du systeme de depot et par son environnement suite au depot de 1980 TUOX-55.

Evaluation des scénarios d'évolution altérée Les premières évaluations, essentiellement qualitatives, de certains scénarios d'évolution altérée suggèrent que ceux-ci n'entraînent pas d'augmentation drastique de l'impact radiologique. Ces évaluations doivent toutefois être approfondies et étendues aux scénarios qui n'ont pas encore été étudiés, afin de fournir des éléments réellement convaincants quant à l'impact de ces scénarios.

4.4 La sous-criticité

La sûreté radiologique à long terme d'un dépôt en profondeur peut être affectée par le phénomène de criticité, c'est-à-dire de réaction nucléaire en chaîne spontanée et soutenue, susceptible de s'y produire (voir section 2.2.4). Ce risque fait donc l'objet d'études, encore au stade embryonnaire à l'heure actuelle, qui se limitent aux risques engendrés par la mise en dépôt de combustibles usés, dans la mesure où les quantités de radionucléides fissiles qu'ils contiennent sont de très loin supérieures à celles rencontrées dans les autres classes de déchets.

Les risques de criticité doivent être évalués à la fois en configuration de référence, c'est-à-dire dans la configuration qui correspond à la géométrie de dépôt initialement prévue, sans altération du combustible ni modification d'origine mécanique de sa géométrie, et en configuration altérée. Les calculs effectués pour des assemblages de combustible en configuration de référence en considérant comme unique perturbation l'intrusion d'eau dans les emballages, qui donc sature le sable de remplissage qu'ils renferment et augmente fortement la modération des neutrons, et donc en principe le risque de réaction nucléaire, indiquent des conditions qui restent néanmoins largement sous-critiques, malgré les hypothèses conservatives faites. A l'exception d'un premier programme de recherche sur la lixiviation de l' UO_2 par l'eau interstitielle de l'Argile de Boom (voir section 3.4.1.2), aucune étude systématique n'a par contre encore été effectuée quant à l'évolution, à la hausse comme à la baisse, des risques de criticité liés à l'altération progressive inévitable de la configuration de référence des assemblages de combustible.

4.5 Les perspectives

L'amélioration de la qualité des évaluations de la sûreté radiologique à long terme dans les prochaines années portera essentiellement sur les points suivants :

- *Discussion approfondie avec les autorités de sûreté de la méthodologie générale des évaluations de sûreté à long terme et de ses acquis, afin d'en clarifier les aspects qui doivent être renforcés, adaptés ou étendus dans les phases ultérieures du programme.*
- *Affinement de la méthodologie des évaluations de sûreté à long terme avec, en particulier, une amélioration de la méthodologie de développement des scénarios, une révision des FEPS à prendre en considération et une meilleure définition des échelles de temps pendant lesquelles les différents éléments du système de dépôt et de son environnement peuvent être considérés comme robustes. L'emploi systématique des fonctions de sûreté et des FEPS vise une intégration poussée, dans les évaluations de*

sûreté, de tous les éléments de l'architecture de dépôt (y compris des déchets à mettre en dépôt), de la barrière géologique et de l'environnement hydrogéologique qui sont pertinents pour la sûreté. La transparence de la méthodologie des évaluations de sûreté sera également rehaussée notamment pour les inventaires de déchets utilisés, les modèles conceptuels et de calcul et les systèmes de dépôt considérés.

- *Affinement des modèles utilisés pour les évaluations de la sûreté à long terme*, en particulier en ce qui concerne les aspects d'abstraction et de simplification du système de dépôt et en ce qui concerne la modélisation de la biosphère dans le scénario d'évolution normale. La relation entre les modèles de recherche détaillés, par exemple en ce qui concerne la dégradation des matrices des déchets ou des emballages métalliques, et les hypothèses ou les modèles simplifiés utilisés dans les évaluations de sûreté sera clarifiée.
- *Intégration de l'impact des hétérogénéités de l'Argile de Boom et de la zone perturbée par l'excavation sur la migration des radionucléides*, ce qui nécessitera une attention particulière à l'impact possible de la présence de sous-couches plus perméables au sein de l'Argile de Boom sur les flux de radionucléides à l'interface entre l'Argile de Boom et les aquifères, et donc sur la sûreté radiologique.
- *Systématisation de la définition, de la sélection et de l'évaluation des scénarios d'évolution altérée* et, en particulier, étude des conséquences sur l'argile et sur l'environnement hydrogéologique du dépôt des changements climatiques potentiels (réchauffement, glaciations, etc.). Les scénarios d'évolution altérée, dont certains ont fait l'objet d'une première description et d'une analyse d'impact exploratoire, seront réévalués de façon intégrée et plus transparente, en concertation étroite avec les autorités de sûreté. Cette réévaluation visera ce faisant un renforcement de la base technique et scientifique de leur description et de leur modélisation, notamment grâce à des discussions élargies avec le monde scientifique.
- *Affinement de la définition et de l'interprétation à donner aux différents indicateurs de sûreté et de protection environnementale*, en particulier pour les différentes échelles de temps considérées.
- *Définition des méthodes d'évaluation de la robustesse du système de dépôt et identification et quantification des éléments contribuant à celle-ci*, y compris une clarification de la relation entre l'optimisation de la sûreté radiologique et le renforcement de la robustesse du système.
- *Identification des différents types d'incertitudes restantes et des moyens nécessaires, le cas échéant, à leur réduction et affinement des méthodes nécessaires à leur traitement*. Au fur et à mesure de son avancement, le programme devra apporter de plus en plus d'attention à la démonstration du fait que les incertitudes restantes peuvent être correctement éliminées ou qu'elles n'ont pas d'influence significative sur la faisabilité technique d'une part et sur la protection de l'homme et de l'environnement d'autre part.
- *Évaluation de sûreté préliminaire pour les classes de déchets conditionnés dans du bitume et dans du béton*, lesquelles porteront essentiellement sur les aspects de compatibilité avec l'Argile de Boom.
- *Compilation de l'ensemble des arguments qualitatifs et quantitatifs* qui supportent indirectement les évaluations de sûreté, principalement des éléments issus de la

caractérisation de la barrière géologique et de l'environnement hydrogéologique qui sont à la base de la stabilité et de la capacité de confinement du système de dépôt, ainsi que des éléments issus de l'étude d'analogues naturels pertinents.

A ces différents points s'ajoutent bien entendu les aspects d'évaluation de la sûreté opérationnelle nucléaire et conventionnelle et d'évaluation du respect des règles de protection environnementale, selon une méthodologie approuvée par les autorités de sûreté. C'est dans ce cadre que seront établies les bases de l'optimisation radiologique (principe ALARA), laquelle constituera également un aspect important de la concertation future avec les autorités de sûreté.

4.48

5 Evaluer les coûts : une méthodologie analytique, paramétrique et flexible

Conformément aux recommandations de la Commission d'évaluation SAFIR (1990), l'ONDRAF a développé une méthodologie systématique d'évaluation des coûts de mise en œuvre des solutions qu'il propose pour la gestion à long terme des déchets des catégories B et C. Cette méthodologie consiste à établir de façon analytique et paramétrique les coûts de base des différentes étapes de la réalisation de ces solutions et à les affecter ensuite de coefficients reflétant le niveau d'incertitude qui les entoure. Il a en outre mis sur pied un mécanisme destiné à assurer dès à présent le financement de ces dépenses éloignées dans le temps.

L'ONDRAF n'a jusqu'ici évalué en détail le coût de la réalisation d'un projet industriel de mise en dépôt en profondeur que pour les déchets vitrifiés et les combustibles usés. Ce sont en effet les seuls pour lesquels il dispose d'une architecture de référence et d'évaluations de la sûreté à un stade suffisamment avancé, même si elles sont bien entendu susceptibles d'encore évoluer fortement. Cette évaluation de coût est toutefois faite dans l'hypothèse vraisemblable d'un dépôt commun à tous les déchets du groupe géologique. Ce dépôt serait construit et exploité progressivement, en deux étapes : d'abord, la partie destinée aux déchets de catégorie B et aux déchets de catégorie C moyennement calorifiques ; ensuite, celle destinée aux déchets vitrifiés et/ou aux combustibles usés, ce qui permettrait de profiter pour ces déchets de l'expérience déjà acquise. (Cette évaluation ne prend en compte ni les coûts de la recherche et développement, qui sont d'environ 150 millions d'EUR de 2000, soit 6 milliards de BEF de 2000, pour la période 1974–2000, ni les coûts et charges indirects.)

L'évaluation des coûts de base, hors marges d'incertitude (table 5.1), nécessite une approche analytique, paramétrique et flexible, afin de pouvoir à tout instant s'adapter aisément aux évolutions qui interviendront inévitablement dans les données de départ (architecture, inventaire, etc.) d'ici la mise en œuvre effective d'un dépôt et donc d'avoir une visualisation claire du comportement des coûts. La méthode consiste à établir, pour chaque évaluation, une feuille de calcul intégrant les types et les quantités de déchets à mettre en dépôt (voir section 3.1.2), l'architecture de dépôt retenue et le métré détaillé correspondant (voir section 3.3.1), le schéma organisationnel de référence de la société qui exploitera le dépôt, les durées de réalisation des différentes phases de travail, l'évaluation des coûts unitaires, la référence des sources d'information et les fourchettes d'incertitude. Ce faisant, cette approche constitue aussi un instrument indispensable à la démarche d'optimisation technique et économique qui devra être menée à un stade plus avancé du programme.

Le calendrier de référence pour la mise en dépôt en profondeur des déchets vitrifiés et des combustibles usés a été établi à partir de scénarios d'exploitation réalistes fondés sur l'état actuel des connaissances relatives à l'architecture de dépôt et aux techniques de construction, d'exploitation et de fermeture. Ce calendrier indicatif prend comme point de départ le moment où l'autorité compétente accorde les autorisations permettant d'entamer les investissements de réalisation, ce qui présume qu'il y a eu choix d'un site. Les durées totales minimales estimées de cette réalisation, depuis l'autorisation jusqu'à la fermeture du dépôt, seraient

d'environ 40 et 50 ans, respectivement pour l'option « retraitement complet » et l'option « mise en dépôt direct » des combustibles usés, dont environ 10 ans consacrés aux études détaillées de sûreté et de conception. Ce calendrier indicatif, qui fera l'objet de révisions régulières, suppose que l'on n'attende pas la mise en place du dernier déchet pour entamer la procédure d'autorisation de fermeture du dépôt, ni pour procéder à la fermeture effective de certaines de ses parties.

Table 5.1 · Evaluations du coût d'un dépôt final pour les déchets vitrifiés et les combustibles usés, dans l'hypothèse d'un retraitement complet et dans celle de la mise en dépôt direct [en 10⁶ EUR de 2000].

Etapas de réalisation	Retraitement complet			Mise en dépôt direct		
	coût de base	marge	coût estimé	coût de base	marge	coût estimé
Construction	190	1.95	371	430	2.40	1032
Exploitation	63	1.95	122	53	2.70	144
Fermeture	36	2.38	85	106	3.00	318
Total	289	-	578	589	-	1494

Les marges d'incertitude sont estimées par l'ONDRAF selon la méthodologie de l'*Electric Power Research Institute* (EPRI), qui a été développée dans le cadre de l'analyse des coûts d'installations électronucléaires et a été transposée au cas de l'évaluation du coût d'un dépôt de déchets radioactifs. Cette méthodologie permet de chiffrer les facteurs d'incertitude à affecter à chacune des trois grandes étapes de la vie du dépôt, considérées comme des projets indépendants : l'étape des études détaillées et de la construction, l'étape de mise en dépôt des colis de déchets (exploitation) et l'étape de fermeture, y compris les opérations de remblayage et le démantèlement des installations de surface. (L'étape de contrôle institutionnel n'est pas prise en compte dans les évaluations économiques actuelles car son impact relatif est jugé négligeable. Les coûts d'éventuelles opérations de récupération des déchets ne le sont pas davantage.)

La méthodologie de l'EPRI considère que l'analyse économique doit intégrer un jugement sur la qualité de ses données constitutives. Elle distingue donc deux types de marges pour imprévus.

- Les *marges pour imprévus de projet* reflètent les aléas liés à la réalisation du projet industriel et sont d'autant plus faibles que le projet est avancé et donc que l'estimation de son coût est fine. Elles se répartissent en quatre fourchettes : 30 à 50 % pour une estimation dite « simplifiée », 15 à 30 % pour une estimation dite « préliminaire », 10 à 20 % pour une estimation dite « détaillée » et 5 à 10 % pour l'estimation finale.
- Les *marges pour imprévus technologiques* reflètent le niveau de connaissance des technologies utilisées et sont d'autant plus faibles qu'il existe des références, telles que des projets comparables ou des installations-pilotes, ou des données de comparaison. Elles se répartissent également en quatre fourchettes : au moins 40 % pour des technologies

entièrement nouvelles, 30 à 70 % pour des technologies pour lesquelles on dispose de certaines données de comparaison, 20 à 35 % si les technologies ont été expérimentées à échelle réduite et 5 à 20 % si les technologies ont déjà été exploitées en vraie grandeur.

En pratique, les analyses actuelles supposent que l'état d'avancement du programme de mise en dépôt permet de faire une estimation préliminaire du coût des étapes de construction et d'exploitation dans le cas de l'option « retraitement complet » et une estimation simplifiée du coût de son étape de fermeture et des trois étapes de l'option « mise en dépôt direct ». Elles supposent par ailleurs que, dans un cas comme dans l'autre, les technologies sont entièrement nouvelles, sans données de comparaison.

Une fois les coefficients globaux de marge pour imprévus calculés par combinaison des deux marges, ils peuvent être appliqués aux coûts de base, pour donner les coûts estimés (table 5.1). La fourchette des coûts prévisibles, évaluée fin 1997, va donc, pour l'option *retraitement complet*, de 290 à 580 millions d'EUR de 2000 (12 à 23 milliards de BEF de 2000). Pour l'option *mise en dépôt direct*, elle va de 590 à 1 500 millions d'EUR de 2000 (24 à 60 milliards de BEF de 2000). Ces évaluations seront revues au fur et à mesure de l'évolution des connaissances, et tout particulièrement au terme de l'expérience de démonstration PRACLAY, dont les conclusions devraient réduire l'incertitude sur certains postes essentiels de l'architecture, comme le mode et la vitesse de construction et d'équipement des galeries. L'ONDRAF développe toutefois actuellement des outils de calcul plus élaborés, qui utilisent notamment comme indicateur de l'évaluation de la maturité technologique d'un projet, le budget de recherche et développement encore nécessaire à la mise au point de l'architecture de l'installation de dépôt.

Les calendriers des opérations de gestion à long terme couvrant plusieurs décennies, l'ONDRAF a par ailleurs mis au point un système de provisions sur base tarifaire applicable aux déchets qu'il prend en charge. Ces provisions, qui sont payées par les producteurs de déchets, alimentent un fonds spécial, appelé *fonds à long terme*, destiné à garantir la disponibilité en temps opportun des moyens nécessaires pour concrétiser la ou les solutions de gestion à long terme qui seront retenues. Le calcul de ces provisions repose sur des critères de répartition objectifs et sur les trois idées suivantes :

- la *réservation de capacité*, par laquelle chaque grand producteur de déchets annonce à l'ONDRAF son programme total de production de déchets, ce qui permet à ce dernier de répartir ses coûts fixes entre les producteurs ;
- le *paiement tarifaire*, par lequel chaque producteur verse au fonds à long terme une contribution correspondant au coût total de la gestion à long terme des déchets qu'il remet à l'ONDRAF ;
- la *garantie contractuelle*, par laquelle chaque grand producteur s'engage à verser au fonds à long terme le solde des coûts fixes imputables à ses déchets qui n'auraient pas déjà été couverts par des paiements tarifaires.

Les évaluations du coût des solutions de gestion constituent donc une importante donnée d'entrée pour le calcul des montants à provisionner dans le fonds à long terme.

6 Conclusions et évaluation de la confiance acquise

Menée dans la ligne des recommandations de la Commission d'évaluation SAFIR (1990), la deuxième phase du programme de recherche et développement méthodologique de l'ONDRAF (1990–2000) relatif à la mise en dépôt final des déchets des catégories B et C dans une argile peu indurée a permis des avancées significatives sur les plans méthodologique, scientifique et technique. Ce programme vise à établir qu'une solution de dépôt au sein d'une formation géologique hôte est possible (c'est-à-dire sûre et faisable) sur le territoire belge. Il comporte deux activités principales :

- *le développement et la mise au point de l'ensemble des méthodes nécessaires à la définition d'une solution de dépôt et à sa mise en œuvre, telles que la caractérisation des déchets, la caractérisation et l'évaluation d'une formation-hôte, le développement d'une architecture de dépôt, les évaluations des performances et de la sûreté, ou encore l'identification des incertitudes restantes ;*
- *l'évaluation de la faisabilité de la solution et des éléments à l'appui de sa sûreté en se fondant, par hypothèse, sur un cas de référence qui est l'Argile de Boom à l'aplomb de la zone nucléaire de Mol-Dessel.*

Dans une proportion moindre, les études ont aussi concerné les Argiles Yprésiennes (examinées à l'aplomb de la zone nucléaire de Doel) comme formation-hôte alternative. Les travaux réalisés à Mol-Dessel et à Doel n'impliquent en rien une décision quant au choix du site sur lequel la solution étudiée serait éventuellement mise en œuvre ; de même, ils se sont limités provisoirement aux classes de déchets jugées les plus pénalisantes des points de vue radiologique et thermique. Le programme belge bénéficie depuis une phase très précoce de son développement des enseignements tirés de la construction et de l'exploitation du laboratoire souterrain de recherche HADES, situé à une profondeur de 223 mètres au sein de l'Argile de Boom à l'aplomb du site du CEN-SCK à Mol.

L'ensemble des acquis de la recherche ne met, pour le moment, en évidence aucun problème à caractère rédhibitoire concernant la mise en dépôt dans l'Argile de Boom des déchets vitrifiés issus du retraitement des combustibles nucléaires usés, ce qui renforce la confiance dans la solution étudiée et confirme que le dépôt en profondeur au sein d'une argile peu indurée reste, pour les déchets considérés dans le rapport SAFIR 2, une option tout à fait envisageable.

Les connaissances accumulées permettent aujourd'hui d'étayer les qualités de l'Argile de Boom comme barrière naturelle. Les travaux réalisés ont aussi démontré la possibilité de construire les installations souterraines nécessaires à un dépôt à une profondeur de l'ordre de 200 à 250 mètres. L'ONDRAF a de plus amélioré sa confiance dans sa méthodologie d'évaluation de la sûreté à long terme et dans sa capacité à concevoir une installation de dépôt capable de protéger l'homme et l'environnement des nuisances potentielles des déchets radioactifs aussi longtemps que nécessaire.

Ceci dit, et sans pour cela remettre en cause le choix de base de l'Argile de Boom, la confiance qu'on peut accorder aujourd'hui au système de dépôt proposé, laquelle repose principalement sur la qualité de la formation-hôte en tant que barrière, est encore insuffisante pour permettre de se prononcer de façon définitive sur la faisabilité technique et sur la sûreté à long terme d'un dépôt dans cette formation. La rétention des radionucléides par la barrière naturelle, les performances des barrières ouvragées et certains aspects de conception et de compatibilité des déchets sont en effet encore entourés d'incertitudes qu'il convient de lever ou de réduire à un niveau acceptable avant d'envisager de passer à une réalisation pratique. En outre, la sûreté opérationnelle d'un tel dépôt et son respect des normes environnementales (toxicité chimique, etc.) n'ont jusqu'à présent fait l'objet que d'études encore très préliminaires. Il en va a fortiori de même pour ce qui est de l'option alternative où les Argiles Yprésiennes sont considérées comme formation-hôte.

Après avoir synthétisé les principaux acquis de la période 1990–2000, ce dernier chapitre expose dans les grandes lignes des éléments d'orientation techniques et scientifiques à considérer pour la définition de la troisième phase de recherche et développement méthodologique telle que l'ONDRAF l'envisage actuellement. Enfin, il évalue le niveau de confiance actuel dans l'option étudiée.

6.1	Les principaux acquis	6.3
6.1.1	Connaissances acquises et questions ouvertes	6.3
6.1.2	Importance relative des incertitudes restantes	6.10
6.2	Eléments d'orientation pour le programme futur de recherche et développement méthodologique	6.15
6.2.1	Les axes principaux	6.16
6.2.2	Les éléments à considérer	6.17
6.2.3	Les prochaines étapes	6.22
6.3	L'évaluation de la confiance	6.25

6.1 Les principaux acquis

Les acquis des travaux réalisés entre 1990 et 2000 concernent tant les connaissances scientifiques et techniques engrangées que l'identification des questions ouvertes et l'évaluation de l'importance relative des incertitudes restantes.

6.1.1 Connaissances acquises et questions ouvertes

Inventaire et connaissance des déchets conditionnés à mettre en dépôt

- *Etablissement d'une approche générale cohérente en matière de définition des déchets.*
- *Etablissement d'une classification générale des déchets radioactifs conditionnés qui facilite l'inventorisation et une gestion transparente.*
- *Amélioration des inventaires (volumes, teneurs en radionucléides critiques) à prendre en compte pour le scénario de retraitement complet et le scénario de mise en dépôt direct des combustibles usés UO_2 issus du programme nucléaire belge actuel. Les caractéristiques physiques (en particulier le dégagement thermique) et chimiques (en particulier la présence de métaux lourds) doivent encore être confirmées pour toutes les classes de déchets et, en particulier, pour les déchets de catégorie B.*
- *Etablissement, sur base des règles générales approuvées par les autorités, des critères d'acceptation des déchets vitrifiés, qui prennent principalement en compte les exigences liées à la gestion à court et à moyen terme de ces déchets (transport, entreposage).*

Evaluation de l'Argile de Boom à l'aplomb de la zone nucléaire de Mol-Dessel en tant que barrière naturelle et connaissance de l'environnement du système de dépôt (voir aussi l'encadré récapitulatif à la fin de la section 6.3)

- *Amélioration de la capacité à caractériser les argiles, notamment par des méthodes de reconnaissances de haute résolution. L'interprétation intégrée, toujours en cours, de l'ensemble des données acquises suggère l'absence de discontinuités structurales (failles) affectant l'Argile de Boom à l'aplomb de la zone nucléaire de Mol-Dessel et permet la reconnaissance en profondeur des variations lithologiques fines, caractéristiques de cette formation, observées en surface.*
- *Confirmation de la valeur de la conductivité hydraulique ($10^{-12} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) obtenue sur carotte (échelle centimétrique) au moyen de tests in situ en forages (échelle métrique) ou autour du laboratoire souterrain (échelle décimétrique).*
- *Révision du modèle hydrogéologique permettant de mettre en évidence le rôle des exutoires locaux des écoulements souterrains. Il subsiste toutefois une incohérence entre la conductivité hydraulique mesurée localement dans l'Argile de Boom et celle déduite de la modélisation régionale (échelle de la centaine de kilomètres). La complexité de l'aquifère situé sous l'argile et la possibilité de court-circuit hydraulique via des failles à l'échelle régionale devraient être considérées afin de la lever. L'analyse de l'origine et de l'évolution de la chimie des aquifères et aquitards n'en est qu'à ses débuts mais pourrait aider à étayer les résultats de la modélisation des écoulements souterrains.*

- *Confirmation des qualités de l'Argile de Boom comme barrière naturelle à la migration des radionucléides.* L'étude expérimentale des propriétés contrôlant la migration dans l'argile s'est considérablement affinée. La migration des radionucléides critiques a été étudiée expérimentalement en laboratoire de surface. Le caractère diffusif de la migration des solutés dans l'Argile de Boom a pu être confirmé au moyen de tests avec traceurs retardés et non retardés dans un volume représentatif d'argile et sur des durées de l'ordre de la décennie. La confiance dans la qualité de la barrière naturelle est encore renforcée par l'observation de la quasi-immobilité sur des temps géologiques de l'uranium et du thorium naturellement présents dans la formation-hôte. Une analyse systématique des paramètres de migration des radionucléides non ou peu retardés sur l'épaisseur totale de la formation indique que ces paramètres restent dans les fourchettes considérées pour les évaluations de sûreté. Des incertitudes subsistent quant aux mécanismes précis de sorption pour quelques radionucléides retardés et à la pérennité de conditions géochimiques favorables à la rétention des radionucléides.
- *Découpage schématique de l'Argile de Boom à l'aplomb de la zone nucléaire de Mol-Dessel en différentes épaisseurs en fonction du contexte dans lequel on se place.* L'épaisseur pour laquelle l'Argile de Boom présente des paramètres de migration pour les radionucléides non retardés quasi constants est d'environ 90 mètres et comprend donc la zone de transition supérieure de la formation. Pour les calculs de migration des radionucléides à travers l'argile, l'épaisseur considérée pour la barrière naturelle n'est toutefois que de 80 mètres. La diminution correspond à l'épaisseur excavée pour la construction de l'installation de dépôt, évaluée à 5 mètres maximum, et à celle de la zone où les paramètres de migration pourraient avoir été perturbés sur le long terme par la construction et la présence du dépôt. Considérant les phénomènes d'autocicatrisation des fissures induites par l'excavation, cette dernière a été estimée à 5 mètres. Les différentes épaisseurs attribuables à l'Argile de Boom selon le contexte sont donc les suivantes (fig. 6.1) : une épaisseur stratigraphique (entre la base et le toit de la formation), une épaisseur lithologique (la partie la plus argileuse de la formation), une épaisseur de l'aquitard (pour laquelle $K_v < 10^{-11} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), une épaisseur où les paramètres de migration sont constants et une épaisseur de la barrière naturelle prise en compte dans les évaluations de sûreté.

Conception et construction de l'installation de dépôt en profondeur

- *Etablissement de bases de conception de l'installation visant à assurer les fonctions de sûreté à long terme en tenant compte des contraintes propres à la formation-hôte et à la profondeur des installations souterraines existantes et, en particulier, (i) à assurer la fonction de confinement physique des déchets pendant la phase thermique et ce, afin d'éviter la lixiviation des matrices et la migration des radionucléides sous des gradients thermiques importants, (ii) à séparer les différentes classes de déchets afin de minimiser les risques d'interactions entre différents types de déchets et de matériaux, et ainsi renforcer la robustesse du système, et (iii) à minimiser les perturbations géomécaniques, thermiques, géochimiques et hydrogéologiques induites dans la formation-hôte.*

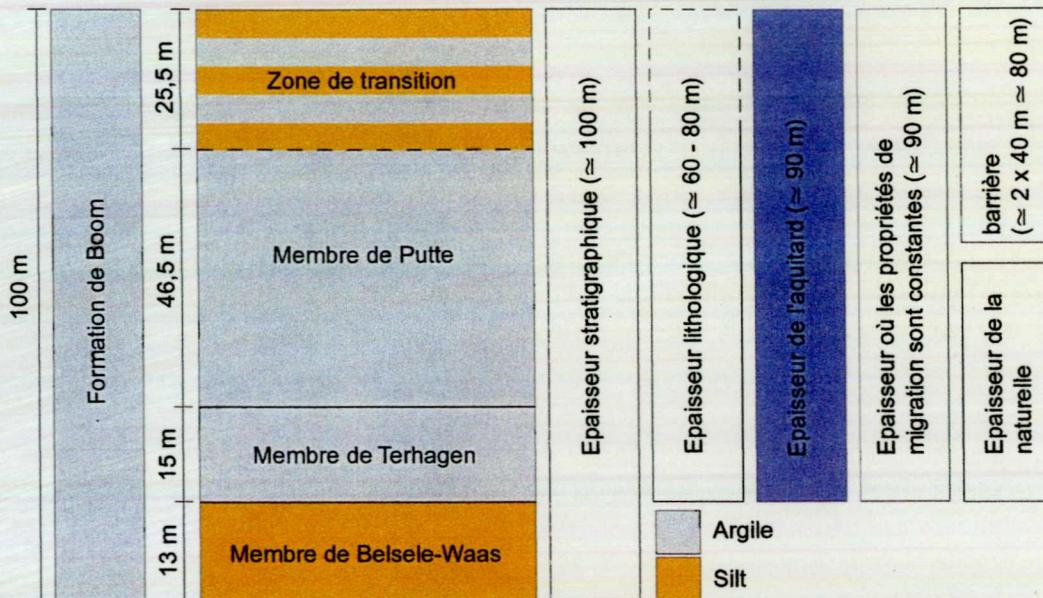


Figure 6.1 Les différentes épaisseurs de la couche d'Argile de Boom à l'aplomb de la zone nucléaire de Mol-Dessel.

- *Définition d'une architecture* (géométrie et matériaux composant l'installation de dépôt) de référence pour les déchets vitrifiés et, secondairement, pour les combustibles usés. L'architecture définie pour les déchets vitrifiés constitue la référence prise pour l'expérience de démonstration in situ en vraie grandeur PRACLAY, qui représente un des points clés du programme actuel et futur. L'architecture du dépôt n'est par contre qu'au stade d'ébauche pour les autres classes de déchets.
- *Mise en évidence*, lors de la préparation de l'expérience PRACLAY, et notamment de la réalisation de la maquette en surface OPHÉLIE, ainsi que lors de la préparation du rapport SAFIR 2, d'une série de questions ouvertes liées aux aspects de mise en œuvre industrielle et à la maîtrise des interactions entre les différents composants de l'installation.
- *Amélioration des techniques de creusement des installations souterraines* : confirmation de la possibilité de creuser un puits dans l'Argile de Boom sans avoir recours à la congélation préalable du massif et définition d'une méthode de creusement industrielle des galeries visant à réduire la convergence de l'argile et qui sera testée lors de la réalisation de la galerie de liaison (projet PRACLAY). L'apparition de fissures au bas du second puits pose des questions importantes quant aux perturbations engendrées par des excavations de diamètres significatifs et à leur impact sur la sûreté.
- *Démonstration de la possibilité de concevoir des scellements peu perméables aux gaz*, même en cas de surpression, et à l'eau.

- *Acquisition d'une expérience pratique significative en matière de sûreté opérationnelle avec la construction et l'exploitation durant plus de 20 ans du laboratoire souterrain HADES (notamment grâce aux expériences in situ impliquant des sources radioactives). Priorité ayant été donnée ces dix dernières années à la sûreté à long terme, l'analyse et l'optimisation de la sûreté opérationnelle (minière et radiologique) ne sont toutefois qu'à un stade peu avancé.*

Compréhension du fonctionnement de l'installation de dépôt en profondeur après fermeture et des perturbations induites par le dépôt au sein de l'Argile de Boom

- *Amélioration de la compréhension du comportement des matrices des déchets. Une durabilité de 10 000 ans minimum a été inférée pour les verres sur base des vitesses de corrosion initiales, très pénalisantes. La dévitrification des verres est en effet très lente et sans incidence significative sur la dissolution de la matrice. La durabilité des matrices UO₂ et des autres constituants des combustibles usés ainsi que la compatibilité des matrices de béton et de bitume ne sont par contre pas encore suffisamment bien connues. Les connaissances acquises sur les déchets bitumés indiquent que la matrice devrait peu contribuer au confinement des radionucléides, de sorte que le bitume n'est pas considéré comme une barrière dans les évaluations de sûreté. En outre, l'étude de leur compatibilité avec le milieu environnant devra considérer des phénomènes tels que le vieillissement, le gonflement et la radiolyse de la matrice en bitume ainsi que le relâchement de nitrates de sodium (déchets EUROBITUM). La compatibilité des classes de déchets autres que les déchets vitrifiés considérées comme les plus pénalisantes des points de vue thermique, radiologique et chimique reste donc une question ouverte.*
- *Amélioration de la compréhension du comportement des (sur)emballages. Les données acquises in situ tendent à confirmer l'existence de matériaux métalliques présentant une résistance à la corrosion généralisée et par piqûres suffisante pour pouvoir être utilisés comme matériaux de (sur)emballage, lequel doit pouvoir assurer la fonction de confinement physique pendant toute la durée de la phase thermique du dépôt. Toutefois, la présence potentielle d'autres types de corrosion pourrait remettre en question le choix du matériau de référence pour le (sur)emballage, à savoir un acier inoxydable austénitique. L'origine et l'influence sur la durabilité des (sur)emballages des chlorures échantillonnés dans les eaux interstitielles de la maquette OPHELIE restent à établir.*
- *Amélioration de la compréhension du comportement du matériau de remblayage. Le matériau de remblayage envisagé dans l'architecture de référence est un mélange d'argile gonflante (pour la stabilité mécanique et l'homogénéisation des propriétés), de sable (afin de limiter la pression de gonflement) et de graphite (pour améliorer la dissipation de la chaleur dégagée par les déchets). Il possède la conductivité thermique requise pour dissiper la chaleur dégagée, mais son hydratation doit être mieux étudiée. L'évolution de la chimie du remblayage au cours de la phase thermique et l'impact du graphite sur la corrosion des aciers restent des questions ouvertes.*
- *Etudes des effets thermiques des déchets hautement calorifiques (verres et combustibles usés). Dans l'état actuel des connaissances, ces effets, tant dans le champ proche que dans le champ lointain, ne remettent pas en cause le dimensionnement prévu pour le dépôt et les matériaux sélectionnés. L'expérience de démonstration PRACLAY permettra*

d'affiner les connaissances relatives au champ proche, notamment en ce qui concerne la resaturation du matériau de remblayage. L'expérience CERBERUS a par ailleurs montré que la minéralogie et la géochimie de l'Argile de Boom ne sont pas significativement modifiées par le réchauffement et l'irradiation. Afin de minimiser les effets thermiques, une première série de critères quantitatifs définissant les températures maximales tolérables en divers endroits du système de dépôt a été établie mais doit encore être confirmée (notamment pour les aquifères, en l'absence de normes en la matière).

- *Etude de la génération et de la migration des gaz.* Cette étude a permis de mettre en évidence la capacité limitée de diffusion des gaz dans l'Argile de Boom, mais aussi la faiblesse des dégagements gazeux par les déchets vitrifiés et les combustibles usés et leurs (sur)emballages respectifs, et donc de conclure à l'absence de véritables difficultés liées à ces phénomènes pour ces deux classes de déchets. La génération de gaz devra toutefois être considérée dans l'évaluation de la sûreté tant radiologique que conventionnelle et dans la conception de la partie de l'installation de dépôt destinée aux autres classes de déchets.
- *Etudes des perturbations induites par radiolyse.* L'absorption du rayonnement gamma par l'ensemble des barrières ouvragées et la forte sorption des principaux émetteurs alpha par le matériau de remblayage garantissent un faible niveau d'irradiation de l'argile. On a pu constater expérimentalement l'absence de modifications chimiques ou minéralogiques significatives suite à l'irradiation à fortes doses de l'argile.
- *Etudes des perturbations induites par la présence de béton.* Le revêtement en béton des galeries de dépôt destinées aux déchets vitrifiés n'engendrera pas de front alcalin significatif et n'aura donc pas d'impact significatif sur la géochimie des champs proche et lointain.
- *Etude toujours en cours de l'impact des nitrates présents dans les déchets bitumés et d'autres espèces chimiques présentes dans les déchets sur la géochimie de l'Argile de Boom et sur la migration des radionucléides.*

Evaluations de la sûreté à long terme

- *Amélioration de la méthodologie d'évaluation de la sûreté à long terme,* grâce notamment à une amélioration de la méthodologie de développement des scénarios et à la définition d'indicateurs de sûreté complémentaires à la dose individuelle.
- *Confirmation des résultats favorables quant au respect des normes radiologiques* pour les trois classes de déchets considérées comme les plus pénalisantes de ce point de vue, à savoir les déchets vitrifiés, les combustibles usés (UO₂ et MOX) et les gaines et embouts compactés. Le rôle primordial de la formation-hôte pour la sûreté à long terme a lui aussi été confirmé.
- *Confirmation de la dominance dans l'impact radiologique des radionucléides non ou peu retardés* (¹²⁹I, ³⁶Cl, ⁷⁹Se, ¹²⁶Sn, ¹⁴C), dont la migration, par diffusion, au sein de l'argile peut être considérée comme suffisamment bien connue, bien qu'il reste des inconnues concernant la géochimie de l'étain et du sélénium. C'est dans le cas de la mise en dépôt direct de combustibles usés que ces radionucléides induisent, pour le scénario d'évolution normale, l'impact radiologique le plus important. Celui-ci apparaît après 20 000 à

40 000 ans environ, mais reste un ordre de grandeur inférieur à la contrainte de dose (et donc deux ordres de grandeur inférieur à la dose induite par le fond de rayonnement naturel en Belgique). Pour tous les autres radionucléides, l'impact radiologique reste inférieur de plusieurs ordres de grandeur à la contrainte de dose. La quantité de radionucléides (famille de l'uranium) responsable après plusieurs millions d'années du second pic radiologique et qui migre à travers l'argile est comparable à la quantité d'uranium naturellement présent dans la formation-hôte autour de l'installation de dépôt.

- *Evaluation préliminaire des conséquences radiologiques de quelques scénarios d'évolution altérée du système de dépôt et de son environnement.* Il s'agit en particulier de la production de gaz au sein du dépôt, d'un puits de pompage dans l'aquifère situé sous l'Argile de Boom et d'un mauvais scellement des voies d'accès au dépôt. Leurs conséquences radiologiques restent faibles et comparables aux conséquences du scénario d'évolution normale.
- *Evaluation préliminaire des risques de criticité,* suggérant que ce phénomène ne devrait pas représenter un problème important pour la sûreté.
- *Evaluation préliminaire de l'impact environnemental des toxiques chimiques contenus dans les déchets,* suggérant que la chimiotoxicité des déchets n'est pas un facteur pénalisant pour l'environnement.
- *Utilisation systématique pour les évaluations de sûreté de data collection forms* donnant, pour chaque paramètre, la meilleure estimation quantitative possible de sa valeur, les valeurs extrêmes et les incertitudes y afférentes, ainsi que les arguments sous-tendant la sélection de ces valeurs.

Evaluation globale du système de dépôt et de son environnement

- L'approche par *fonctions de sûreté à long terme* permet une évaluation systématique des rôles assurés par le système de dépôt et son environnement pris dans leur ensemble ainsi que par chacun de leurs constituants pris individuellement. Elle permet aussi d'établir un lien fort entre la conception de l'architecture du dépôt, la compréhension des phénomènes qui s'y déroulent au cours du temps et la sûreté. La table 6.1 reprend les fonctions spécifiques assurées par les principaux constituants du système de dépôt et de son environnement pour les trois phases postérieures à la fermeture du dépôt, définies comme suit :

Phase thermique : période immédiatement postérieure à la fermeture du dépôt, au cours de laquelle le confinement physique par le (sur)emballage doit être assuré. Elle correspond à la période où un gradient thermique important est encore présent entre le déchet et l'Argile de Boom non perturbée, soit quelques centaines d'années pour les déchets vitrifiés et quelques milliers d'années pour les combustibles usés.

Phase d'isolation : période postérieure à la phase thermique, au cours de laquelle le confinement des déchets par l'ensemble des barrières ouvragées est toujours significatif et auquel s'ajoute la fonction de retard et d'étalement du relâchement dans la formation-hôte pour les radionucléides atteignant cette dernière. Elle a une durée d'environ 10 000 ans et se caractérise par un impact radiologique quasi nul sur l'environnement.

Phase géologique : période au-delà de 10 000 ans, au cours de laquelle les fonctions de retard et d'étalement du relâchement et de dilution/dispersion jouent le rôle primordial. Elle est caractérisée par un impact radiologique très faible sur l'environnement.

- Les différences entre les fonctions réellement assurées par les différents constituants du système de dépôt et celles considérées dans les évaluations de sûreté à long terme peuvent être interprétées en quelque sorte comme des *réserves de sûreté à long terme* du système et de son environnement et contribuent donc à renforcer la robustesse de la solution proposée.

Table 6.1 Fonctions de sûreté à long terme assurées par les principaux constituants du système de dépôt et de son environnement pour les différentes phases postérieures à la fermeture du dépôt (**En gras**, les fonctions prises en compte pour l'évaluation de la sûreté radiologique à long terme du scénario d'évolution normale du système de dépôt : **C1** = étanchéité (confinement physique) ; **R1** = résistance à la lixiviation (retard et étalement du relâchement) ; **R2** = diffusion et rétention (retard et étalement du relâchement) ; **D** = dilution et dispersion. La fonction de sûreté C2 de limitation des arrivées d'eau (confinement physique) n'est pas prise en compte dans les évaluations de sûreté.)

Constituant	Phase thermique (quelques centaines à quelques milliers d'années)	Phase d'isolation (< 10 000 ans)	Phase géologique (> 10 000 ans)
Matrice de verre	–	R1	R1
Matrice UO ₂	–	R1	R1
Matrice de béton / ciment	–	–	–
Matrice de bitume	–	–	–
Emballage primaire	C1	R2	–
(Sur)emballage	C1	R2	–
Tube de dépôt	C1	R2	–
Remblayage	C2	R2	R2
Scellement	C2	R2	R2
Revêtement des galeries	–	–	–
Revêtement des puits	–	–	–
Formation-hôte	C2	R2	R2
Aquifères	–	D, R2	D, R2
Biosphère	–	D	D

Evaluation des Argiles Yprésiennes en tant que formation-hôte alternative

- *Reconnaissance préliminaire géologique et hydrogéologique des Argiles Yprésiennes sous la zone nucléaire de Doel.* L'interprétation des résultats est toujours en cours et ne permet pas, actuellement, de se faire une opinion détaillée quant aux potentialités des Argiles Yprésiennes en tant que formation-hôte.

- *Mise en évidence d'une épaisseur d'environ 114 mètres présentant une fraction argileuse élevée et des conductivités hydrauliques faibles (10^{-10} m·s⁻¹ in situ et 10^{-11} à 10^{-12} m·s⁻¹ en laboratoire).*
- *Mise en évidence de la présence d'eaux interstitielles salées, de la présence de failles intraformationnelles à l'échelle régionale et de caractéristiques géomécaniques indiquant des difficultés potentielles en matière de creusement dans le massif.*

Evaluation des coûts et financement

- *Développement d'une méthodologie d'évaluation des coûts de mise en dépôt en profondeur à la fois analytique, paramétrique et flexible permettant de résoudre le problème des marges d'incertitude inhérentes aux projets à très long terme tout en étant capable de s'adapter sans difficulté à tous les changements futurs d'architecture.*
- *Mise au point d'un système de provisions sur base tarifaire applicable aux déchets conditionnés et non conditionnés pris en charge par l'ONDRAF et destiné à alimenter un fonds à long terme qui doit garantir la disponibilité en temps opportun des moyens financiers nécessaires pour concrétiser la ou les solutions de gestion à long terme qui seront retenues.*

6.1.2 Importance relative des incertitudes restantes

L'évaluation de l'importance relative des incertitudes résiduelles constitue un autre acquis appréciable du programme 1990–2000. Cette évaluation se fonde principalement sur

- la connaissance des processus et des caractéristiques contrôlant le fonctionnement et l'évolution du système de dépôt en profondeur ;
- l'analyse de la manière dont le système de dépôt et son environnement assurent les fonctions de sûreté à long terme ;
- les résultats des différentes évaluations de sûreté déjà conduites.

Les incertitudes résiduelles qui influencent le plus la sûreté radiologique à long terme sont traitées ci-dessous par ordre d'importance décroissante des composants du système de dépôt et de son environnement, à savoir

- la barrière géologique naturelle (fonction R2) ;
- le (sur)emballage (fonction C1) ;
- les matrices des déchets (fonction R1) ;
- les aquifères (fonction D) ;
- la biosphère (fonction D).

Les incertitudes directement liées à la mise en œuvre de l'architecture de référence sont absentes de cette liste, à l'exclusion de celles qui sont pertinentes à la fonction de confinement pendant la phase thermique. Elles n'en sont pas moins importantes mais, étant considérées comme d'ordre strictement technologique, elles devraient pouvoir être

suffisamment réduites en appliquant des approches d'ingénieur éprouvées et en réalisant une expérience de démonstration de type PRACLAY.

La discussion des incertitudes distingue les incertitudes au niveau des scénarios, les incertitudes au niveau des modèles (processus entrant en ligne de compte, modèles conceptuels et codes numériques) et les incertitudes au niveau des paramètres utilisés pour les évaluations de sûreté. L'appréciation globale de ces incertitudes résiduelles est mise en perspective dans le cadre de l'évaluation de la confiance actuelle dans la solution étudiée (voir section 6.3).

La barrière géologique naturelle – Argile de Boom

L'Argile de Boom formant la principale barrière une fois que le confinement physique n'est plus assuré, les incertitudes relatives à sa performance revêtent une importance primordiale.

Les incertitudes relatives aux scénarios portent sur l'évolution ou la perturbation potentielle de la barrière argileuse par suite d'événements extérieurs (activité sismique, changements climatiques, modifications géochimiques, etc.) ou de processus propres au système de dépôt final (production de gaz, augmentation de la température, création d'un front alcalin, creusement).

Les incertitudes *propres aux événements extérieurs* ont une importance différente selon que les radionucléides sont retardés ou pas. Elles n'ont que peu d'importance pour les radionucléides non retardés, parce que leur migration s'opère durant la phase d'isolation (environ 10 000 ans), pendant laquelle la formation-hôte ne subira guère de modifications susceptibles d'influencer leur cheminement de manière significative. Elles sont plus importantes pour les radionucléides retardés, parce que leur migration se déroule sur un laps de temps beaucoup plus long (environ 100 000 ans à un million d'années). Les perturbations potentielles de l'Argile de Boom seront en grande partie dictées par les modifications environnementales au cours de la phase géologique, notamment par les changements climatiques. Ces perturbations et les incertitudes afférentes n'ont pas encore été suffisamment répertoriées. La capacité de l'Argile de Boom à résister aux changements chimiques, minéralogiques, hydrauliques ou encore mécaniques par exemple est sans doute importante, mais devra être confirmée. Ceci dit, les événements perturbateurs extérieurs influenceront la sûreté radiologique de façon de moins en moins marquée avec le temps, suite à la diminution considérable par décroissance radioactive de la radiotoxicité des déchets au cours des phases thermique et d'isolation.

En ce qui concerne les processus perturbateurs *propres au système de dépôt final*, l'augmentation de la température dans l'Argile de Boom pourra toujours être limitée à une valeur qui n'occasionnera pas de changements notables en modifiant adéquatement l'architecture du dépôt. Les incertitudes liées aux perturbations suivantes méritent par contre une attention plus soutenue :

- la production de gaz par corrosion, et ce principalement pour les déchets de catégorie B ;
- la migration d'un front alcalin suite à la dégradation du béton présent ;
- le gonflement possible des déchets à matrice de bitume (principalement les déchets EUROBITUM) ou le relâchement de quantités importantes de nitrates de sodium par ces mêmes déchets ;
- l'induction de fissures lors du creusement.

L'incertitude relative aux modèles est très faible en ce qui concerne les radionucléides *non retardés*, les processus physicochimiques déterminant leur migration ayant été clairement établis et les modèles de calcul largement testés (expériences de migration à différentes échelles, exercices de comparaison, codes numériques utilisés au niveau international, etc.). En ce qui concerne les radionucléides *retardés* toutefois, l'établissement d'une distinction entre rétention par sorption et par précipitation est nécessaire pour la compréhension de la géochimie des éléments et la modélisation des résultats expérimentaux. L'étude du comportement des radionucléides naturellement présents dans l'Argile de Boom continuera ceci dit à livrer énormément d'informations. Par ailleurs, la complexation avec les molécules organiques mobiles ne semble pas être une source importante d'incertitude, mais cela reste à confirmer pour certains radionucléides. Enfin, la possibilité de mouvements d'eau advectifs au sein même de la formation-hôte (bandes plus perméables) nécessitera un éclaircissement, mais ne représente vraisemblablement pas non plus une source importante d'incertitude.

L'incertitude relative aux paramètres est, pour les radionucléides *retardés*, directement liée aux mécanismes de retard (sorption, précipitation, etc.) et, partant, à l'incertitude relative aux modèles mentionnée plus haut. L'homogénéité verticale de la formation-hôte quant aux propriétés de migration pour ces radionucléides doit encore être vérifiée. La connaissance des paramètres de migration des radionucléides critiques *non retardés* est par contre suffisante.

Le (sur)emballage

Les incertitudes relatives au suremballage métallique prévu pour les déchets vitrifiés et à l'emballage métallique étanche prévu pour les combustibles usés semblent moins déterminantes pour la sûreté que celles propres à la barrière argileuse, pour les raisons suivantes.

L'incertitude relative aux scénarios qui doit être traitée en premier lieu concerne le scénario de défaillance prématurée du confinement physique durant la phase thermique, qui devra à l'avenir être pris en compte dans les évaluations de sûreté. Cette incertitude peut être réduite par des choix corrects de matériaux et de techniques de mise en œuvre (par exemple de soudure), par un programme d'assurance de la qualité et par une approche de conception de l'architecture du dépôt favorisant la prévention de la corrosion.

Il subsiste en outre des incertitudes significatives quant à l'évolution de la géochimie du champ proche (en particulier, de celle du matériau de remblayage pendant la phase thermique et sa resaturation) et à son influence sur les vitesses et les types de corrosion.

L'incertitude relative aux modèles a trait à la modélisation du ou des processus de corrosion qui détermineront la durée de vie des (sur)emballages. Le programme actuel n'ayant pas encore permis d'exclure certains types de corrosion potentiellement pénalisants, comme la corrosion sous tension, la corrosion intergranulaire et la corrosion microbologique, cette incertitude reste importante et pourrait amener à revoir le choix du matériau de (sur)emballage. La réduction de cette incertitude constitue un des éléments clés pour la phase suivante du programme, de manière à fournir un faisceau d'arguments à l'appui de la garantie de la fonction de confinement physique (choix du matériau, conditions géochimiques du champ proche, prévention de la corrosion, faisabilité technico-industrielle).

L'incertitude relative aux paramètres est, selon les évaluations de sûreté, relativement peu importante, parce que l'impact radiologique est insensible à la durée de vie du (sur)emballage au-delà de la phase thermique. Elle est entièrement éclipsée par la performance de la barrière argileuse et par l'incertitude sur le scénario de défaillance prématurée du (sur)emballage.

Les matrices des déchets

Les incertitudes concernant les matrices de déchets doivent être considérées pour diverses raisons. Pour les déchets vitrifiés et les combustibles usés, la matrice peut, par sa durée de vie, contribuer efficacement à la fonction de sûreté de retard et d'étalement du relâchement : cette contribution s'ajoute à celle de l'Argile de Boom. Les matrices des déchets peuvent toutefois perturber le comportement des autres barrières, et notamment l'Argile de Boom. Bien qu'une perturbation significative de l'Argile de Boom par les déchets vitrifiés et les combustibles usés soit pratiquement exclue (peu d'influences chimiques, possibilité de réduire l'impact thermique, protection contre l'effet des radiations directes dans l'argile par la présence du matériau de remblayage, peu de production de gaz, pas de gonflement), la compatibilité chimique et physique des matrices de bitume et de béton avec le système de dépôt représente encore une incertitude générale à lever, de sorte que la suite du texte consacré aux matrices porte exclusivement sur les verres et les combustibles usés en tant que barrières. Enfin, la connaissance de l'inventaire en radionucléides critiques contenus dans les matrices doit être adéquate.

L'incertitude relative aux scénarios est insignifiante parce que couverte par les deux autres formes d'incertitude.

L'incertitude relative aux modèles est liée aux mécanismes de dégradation décisifs pour la durée de vie de la matrice et pour le relâchement des radionucléides (verres et combustibles usés, les seules matrices à être considérées comme barrière). Si la connaissance des mécanismes de dégradation des déchets vitrifiés a atteint un stade bien avancé, elle est par contre encore nettement insuffisante pour les combustibles usés. Cette incertitude est couverte dans les évaluations de sûreté par l'application de deux modèles de dégradation, qui débouchent sur des durées de vie différentes. L'incertitude relative à la durabilité de ces matrices n'a toutefois guère d'importance en raison du fait que la sûreté radiologique à long terme y est insensible. La contribution des matrices à la fonction de sûreté de retard et

d'étalement du relâchement est en effet largement éclipsée par la contribution de l'Argile de Boom.

Une incertitude complémentaire pour les combustibles usés réside dans la manière d'aboutir à la simplification argumentée du terme source (représentation de l'hétérogénéité des assemblages de combustible) qui devra être utilisée dans le cadre des évaluations de sûreté. Quant aux **incertitudes relatives aux paramètres**, la vitesse de relâchement des radionucléides des matrices de déchet n'a qu'une influence restreinte sur l'impact radiologique, ce qui rejoint la conclusion quant aux incertitudes relatives aux modèles abordées ci-avant, et les incertitudes sur les inventaires en radionucléides critiques n'ont pas vraiment d'influence sur la sûreté radiologique à long terme, vu les marges qui existent entre les résultats de ces évaluations et les normes de protection applicables. Cependant, il faudra confirmer ces inventaires (de même que les inventaires en éléments potentiellement chimiotoxiques) pour les déchets à mettre effectivement en dépôt.

Les aquifères

Les aquifères ne forment pas une barrière à proprement parler, mais contribuent naturellement à la dilution des flux de radionucléides quittant l'Argile de Boom. Les incertitudes au niveau des aquifères se reportent donc directement sur l'évaluation de la performance du système si cette évaluation utilise la dose comme indicateur de sûreté. Les changements (hydrodynamiques et/ou hydrogéochimiques) au niveau des aquifères peuvent par ailleurs éventuellement perturber la formation-hôte

Deux des incertitudes au niveau des aquifères concernent l'*échelle locale* et méritent plus d'attention, à savoir le caractère localisé des exutoires des écoulements souterrains et l'impact thermique sur les écoulements ainsi que sur la chimie et la biologie des eaux. Les autres incertitudes concernent l'*échelle régionale*. Ce sont

- **les incertitudes relatives aux scénarios**, qui concernent les évolutions futures naturelles et induites (changements climatiques, pompages, etc.) ;
- **les incertitudes relatives aux modèles**, qui concernent la géométrie à considérer et les conditions aux limites du système hydrogéologique ;
- **les incertitudes relatives aux paramètres**, qui concernent, d'une part, les dimensions et les conductivités hydrauliques des différents aquifères (en particulier, des aquifères profonds) et, d'autre part, l'incertitude restante sur la conductivité hydraulique en grand (présence de failles hydrauliquement actives) de l'Argile de Boom, qui influe sur le résultat de la modélisation hydrogéologique régionale.

Les incertitudes relatives aux scénarios sont traitées au niveau de la barrière naturelle parce que la résistance de cette dernière à des modifications environnementales constitue un facteur important (par exemple en cas d'inversion du gradient hydraulique). Les autres incertitudes peuvent se traduire, en définitive, dans les évaluations de sûreté, par des incertitudes sur les paramètres, notamment par une incertitude quant à la capacité de dilution.

Les flux de radionucléides maximum susceptibles de quitter le système de dépôt et d'aboutir dans les aquifères doivent donc être suffisamment faibles pour que l'incertitude quant à ce facteur de dilution devienne insignifiante.

La biosphère

A l'instar des aquifères, la biosphère ne constitue pas une barrière. Les incertitudes au niveau de la biosphère n'influencent donc les performances évaluées du système de dépôt que de façon indirecte, et pour autant que la dose ait été utilisée en tant qu'indicateur de sûreté.

Aux incertitudes au niveau de la biosphère s'ajoutent les incertitudes sur les activités qui prennent place dans la biosphère et, en particulier, les incertitudes liées aux intrusions humaines. La perturbation du système de dépôt par intrusion humaine est principalement traitée comme une incertitude au niveau de la barrière naturelle et de l'installation de dépôt : quelle est la performance résiduelle du système en cas, par exemple, de forage jusqu'aux déchets ? Dans l'avenir, cet aspect sera traité dans des scénarios spécifiques aux intrusions humaines.

6.2 Eléments d'orientation pour le programme futur de recherche et développement méthodologique

A l'heure actuelle, l'ONDRAF ne dispose pas encore de toutes les bases nécessaires à la définition précise et concrète de la prochaine phase de son programme de recherche et développement méthodologique. En particulier, le rapport SAFIR 2 sera, à la demande du Gouvernement, soumis à l'Agence de l'OCDE pour l'Energie Nucléaire (AEN) en vue d'un examen international. Les conclusions de cet examen et les décisions que prendront les autorités de tutelle de l'ONDRAF quant à la suite à donner au rapport SAFIR 2 devraient être disponibles fin 2002 ou courant 2003. Il est cependant possible, en fonction des principaux acquis, des perspectives déjà identifiées ainsi que de l'évaluation des incertitudes restantes, de proposer ici une série d'éléments scientifiques et techniques à prendre en considération pour la suite des travaux méthodologiques. Ces propositions ne préjugent en rien des décisions qui seront prises par ailleurs dans le cadre de la concertation de société qui devrait bientôt s'instaurer autour de la gestion à long terme des déchets radioactifs (voir à ce sujet le document ONDRAF *Vers une gestion durable des déchets radioactifs* qui accompagne le rapport SAFIR 2), ni des impositions complémentaires, notamment en terme de récupérabilité des déchets, qui pourraient voir le jour.

Il est important de noter qu'il n'est pas nécessaire, dans le cadre d'un tel programme, de lever toutes les incertitudes résiduelles ; il faut par contre les réduire suffisamment et de façon adéquate compte tenu des différentes décisions qui devront être prises.

Les éléments scientifiques et techniques à prendre en considération pour la suite des travaux méthodologiques s'articulent autour de six axes principaux, six fils conducteurs selon lesquels

l'ONDRAF élaborera dans les meilleurs délais des réponses satisfaisantes aux questions essentielles encore ouvertes, tout en améliorant la cohérence entre les différents aspects du système de dépôt, afin de préparer la transition de la troisième phase de recherche et développement méthodologique vers la phase d'avant-projet, et ce notamment grâce à l'expérience PRACLAY.

6.2.1 Les axes principaux

Intégration Le programme visera à intégrer et à mettre en cohérence, selon une approche structurée (systématique et systémique), tous les aspects relatifs au dépôt. Ceci nécessitera une amélioration de la gestion des interfaces entre les travaux de recherche et développement (compréhension), d'une part, et les travaux de conception des architectures et les évaluations de sûreté, d'autre part. L'analyse systématique des FEPS en vue de la construction de scénarios d'évolution à la crédibilité renforcée, ainsi que la généralisation de l'approche par fonctions de sûreté, qu'on étendra aux aspects de sûreté opérationnelle, unifieront les différentes disciplines.

Robustesse Le programme étudiera systématiquement l'impact possible de tous les choix proposés, en particulier en matière d'architecture, sur la robustesse du système de dépôt final, c'est-à-dire sur l'insensibilité de son fonctionnement aux incertitudes restantes. Il s'intéressera à la mise en œuvre des solutions proposées, à la confiance que l'on pourra accorder à la démonstration des performances attendues des différents composants du système de dépôt, à l'importance du rôle et de la performance de chaque composant du dépôt dans la performance globale du système (analyse de la redondance et de l'indépendance fonctionnelle des barrières) et à l'identification des éléments de fragilité éventuels. Des indicateurs de robustesse seront développés et appliqués dans ce but.

Sûreté Le programme s'attachera à affiner les évaluations de sûreté pour qu'elles testent au mieux les aspects d'intégration et de robustesse, notamment par l'identification et la maîtrise des incertitudes et l'utilisation de différents indicateurs de sûreté. Ceci devra se faire en étroite concertation avec les autorités de sûreté.

Démonstration Le programme se focalisera sur les aspects liés directement à la mise en œuvre de l'architecture de dépôt et, partant, mettra l'accent sur la faisabilité et la démonstration, encadrées de façon équilibrée par une vérification scientifique des modèles utilisés. Ainsi se poursuivra l'expérience PRACLAY de démonstration en vraie grandeur, fondamentale à la fois en tant que test de faisabilité, comme moyen de vérification des modèles et pour des raisons de visibilité.

Transférabilité Le programme évaluera systématiquement dans quelle mesure et avec quelle efficacité les acquis méthodologiques, techniques et scientifiques relatifs à l'Argile de Boom à Mol-Dessel peuvent être transférés à d'autres formations-hôtes (en particulier aux Argiles Yprésiennes) ou à d'autres sites. Il s'agit là non seulement d'un souci d'optimisation des résultats et de la conduite des recherches, mais aussi d'une analyse de la flexibilité de la solution étudiée.

Traçabilité Etant donné le temps que prennent le développement et la mise en œuvre d'un système de dépôt en profondeur, le caractère éminemment multidisciplinaire des études entreprises et la masse des résultats engrangés, le programme s'appliquera à mettre en place un système de traçabilité des informations qui devra garantir la pérennité, l'accessibilité, la transparence et le partage des acquis. Ce système devra assurer l'inventaire exhaustif et systématique de l'ensemble des résultats, données, modèles, hypothèses, décisions, interprétations, etc., et les rationaliser de manière à faciliter l'évaluation de leur qualité et de leur pertinence ainsi que leur diffusion efficace au sein du programme et vers les autres parties prenantes, et ce, sur plusieurs générations.

6.2.2 Les éléments à considérer

Les éléments à considérer dans la définition de la troisième phase du programme de recherche et développement méthodologique portent sur tous les aspects du dépôt final en profondeur et concernent essentiellement, pour des raisons budgétaires et d'établissement des priorités, l'option de référence, soit l'Argile de Boom à Mol-Dessel. Ces éléments peuvent s'exprimer schématiquement selon le canevas utilisé à la section 6.1.1.

Inventaire et connaissance des déchets à mettre en dépôt

- *Mise en place d'un système global de qualité* devant garantir la qualité des informations en matière d'inventaire et de caractérisation des déchets en vue de leur mise en dépôt en profondeur et améliorer la traçabilité et la transparence de ces informations (scénarios de production, codes de calculs, mesures de contrôle, etc.).
- *Confirmation et maintenance de l'inventaire* (volumes, teneurs en radionucléides critiques pour la sûreté à court et à long terme) pour toutes les classes de déchets autres que les déchets vitrifiés et les combustibles usés UO₂. Confirmation des propriétés physiques et chimiques pour toutes les classes de déchets.
- *Etablissement de scénarios de prévision de production de déchets qui tiennent davantage compte des évolutions futures éventuelles* en matière de production énergétique et de gestion globale du cycle du combustible nucléaire.
- *Etablissement des critères d'acceptation manquants.*

Evaluation de la formation-hôte en tant que barrière naturelle et connaissance de l'environnement du système de dépôt

- *Intégration, mise en cohérence et traitement systématique* (origine, localisation et qualité) de toutes les données géoscientifiques afin de renforcer la confiance dans les qualités de barrière de la formation-hôte et dans la capacité à la caractériser et à en comprendre le comportement.
- *Affinement de la connaissance des hétérogénéités lithologiques et des discontinuités structurales de l'Argile de Boom et de leurs conséquences* pour les écoulements d'eau (variabilité spatiale de la conductivité hydraulique et extrapolation à différentes échelles) et la migration des radionucléides.

- *Poursuite de la caractérisation radiochimique* afin d'aider à l'évaluation de l'homogénéité de la formation, d'étudier le comportement à long terme de l'uranium et du thorium ainsi que les interactions entre l'argile et l'aquifère sus-jacent et d'établir un point de comparaison pour les indicateurs de sûreté tels que les flux et les concentrations.
- *Affinement du modèle hydrogéologique régional* de manière à prendre en compte de façon explicite les aquitards ainsi qu'à considérer les hétérogénéités verticales et horizontales de conductivité hydraulique au sein de l'Argile de Boom et de l'aquifère du Sous-Rupélien, et ainsi de lever ou d'expliquer l'incohérence constatée entre les valeurs de conductivité hydraulique de l'Argile de Boom mesurées localement et calculées à l'échelle régionale.
- *Développement d'une approche intégrée des modèles hydrogéologiques aux différentes échelles* (harmonisation des codes de calcul et des conditions aux limites).
- *Confirmation du caractère local des exutoires des écoulements.*
- *Evaluation de la sensibilité du système géologique, hydrogéologique et hydrogéo-chimique* (y compris les propriétés de migration) *aux perturbations naturelles ou induites* (pompages, mouvements sismiques, changements des conditions climatiques et environnementales, etc.) comme une des bases de l'analyse des scénarios nécessaire aux évaluations de sûreté à long terme.
- *Utilisation de l'hydrogéo-chimie aux fins de vérification des résultats des modèles hydrogéologiques.*
- *Affinement de la compréhension des processus de rétention opérant dans l'Argile de Boom* afin de justifier la confiance dans les valeurs des paramètres de migration sélectionnées pour les radionucléides critiques.
- *Finalisation de l'étude de l'influence de la matière organique sur la migration des radionucléides* au sein de l'Argile de Boom.
- *Analyse des spécificités des Argiles Yprésiennes vis-à-vis d'un dépôt en profondeur et des connaissances acquises pour l'Argile de Boom* : présence d'eau interstitielle salée, faible résistance mécanique, faible conductivité thermique, présence et rôle de voies préférentielles pour la migration de fluides.

Conception et construction de l'installation de dépôt

- *Définition des critères techniques relatifs à l'architecture générale du dépôt et à ses différents composants et analyse des choix possibles*, ce qui nécessite la fixation de prescriptions univoques concernant les augmentations maximales de température autorisées pour les différents composants du dépôt et de son environnement ainsi, éventuellement, qu'en matière de récupérabilité des déchets pendant une période définie.
- *Compte tenu des exigences liées à la sûreté radiologique et opérationnelle et à la faisabilité technique et économique, révision des bases de conception du dépôt selon une approche systématique considérant l'installation de dépôt et la formation-hôte comme un tout et attachant suffisamment d'attention aux interactions possibles entre ses divers composants et à leur complémentarité.* Le programme futur s'attachera ensuite à redéfinir les architectures et, plus précisément, à revoir l'architecture de référence pour les déchets

vitrifiés et les combustibles usés et à préciser l'architecture pour une classe de déchets de catégorie B représentative. Il s'attachera ensuite à intégrer les différentes architectures développées au sein d'un système de dépôt unique et cohérent, techniquement satisfaisant, clairement spécifié, dûment justifié et dont on peut apporter la démonstration qu'il répond à toutes les exigences initiales, y compris à celles liées à la mise en œuvre in situ.

- *Démonstration en vraie grandeur, grâce à l'expérience PRACLAY, de la faisabilité de l'architecture de dépôt de référence révisée.*
- *Etude plus approfondie et optimisation du choix des matériaux pour les différents constituants du système de dépôt. Pour les sur(emballages), le programme futur adoptera une approche intégrée prenant en compte l'ensemble des paramètres susceptibles d'influer sur la corrosion. Il se focalisera sur une meilleure compréhension de l'évolution de la géochimie du milieu au cours du temps et sur une approche de prévention de la corrosion. Il examinera la problématique des soudures en termes de faisabilité et de comportement à la corrosion. Il étudiera aussi la composition à donner aux matériaux de remblayage et aux matériaux de scellement en fonction de leur rôle, de leurs performances attendues et de leur mise en œuvre.*
- *Evaluation des possibilités d'évacuation des gaz de corrosion générés par les déchets de catégorie B sans dégradation de la performance de la barrière naturelle.*
- *Réévaluation de l'impact thermique sur l'ensemble des composants du système de dépôt et de son environnement et, le cas échéant, modification de la géométrie des installations.*
- *Identification et évaluation des éléments de flexibilité technique de l'architecture de dépôt, en particulier ceux qui sont importants pour la récupérabilité des déchets.*
- *Elaboration des modalités d'exploitation du dépôt. L'ensemble du système d'exploitation sera directement conditionné par le fait que l'installation devra ou non être considérée comme une zone potentiellement contaminée.*
- *Evaluation des modalités de fermeture du dépôt et du monitoring afférent. Cette évaluation devra considérer en parallèle les aspects liés aux prescriptions en matière de safeguards et l'impact sur la sûreté à court et à long terme.*

Compréhension du fonctionnement de l'installation de dépôt après sa fermeture et des perturbations induites par le dépôt dans l'Argile de Boom

- *Confirmation des qualités de barrière des verres dans des conditions de dépôt représentatives. La durabilité des déchets vitrifiés issus du retraitement n'ayant pas d'impact significatif sur le flux des radionucléides à l'interface entre l'Argile de Boom et les aquifères, le programme futur devra apprécier les incertitudes tolérables sur ce paramètre, notamment en démontrant le caractère ultraconservatif de la valeur retenue actuellement, et ainsi estimer la réserve de sûreté y associée. Il étendra également l'étude du comportement à la lixiviation à d'autres radionucléides considérés comme critiques ou potentiellement critiques.*
- *Evaluation des perturbations induites par les différents composants ouvragés du système de dépôt dans la formation-hôte. Le programme futur devra démontrer que la géochimie*

favorable de la formation-hôte, dont le maintien à long terme est essentiel pour la sûreté du système de dépôt, ne risque pas d'être perturbée de façon inacceptable par la présence du dépôt. Il étudiera notamment l'impact sur les propriétés de rétention de l'argile des perturbations consécutives à l'apparition de fronts chimiques (y compris un front d'oxydation dû à l'excavation et à l'exploitation du dépôt).

- *Evaluation des modalités de construction du dépôt.* Le programme futur donnera la priorité à une amélioration de la compréhension et de la modélisation du comportement hydromécanique instantané de l'Argile de Boom lors du creusement en estimant les dimensions de la zone perturbée par l'excavation et son impact sur la migration. Il approfondira l'étude du comportement différé de l'argile, en particulier de l'évolution dans le temps des fissures induites par l'excavation (confirmation des capacités d'autocicatrisation de l'argile), et des contraintes exercées par la formation sur les revêtements ainsi que des déformations de ces revêtements.
- *Etude de la génération de gaz par corrosion anaérobie, en particulier des emballages des déchets de catégorie B, et par activité bactériologique en fonction du temps et étude de son couplage avec la géochimie.* Cette étude devra être complétée par l'analyse de la migration de ces gaz au sein de l'argile (fracturation, amélioration de la précision des coefficients de diffusion de l'hydrogène et du méthane) ainsi que par l'analyse des possibilités d'évacuer de façon contrôlée les gaz produits sans mettre en péril le confinement des déchets.
- *Etude du comportement des combustibles usés dans des conditions de dépôt représentatives.*
- *Approfondissement de l'étude du comportement des classes de déchets dont la compatibilité avec l'argile est incertaine, et notamment du comportement des déchets bitumés.*

Evaluation de la sûreté opérationnelle et de la sûreté à long terme

- *Discussion approfondie avec les autorités de sûreté de la méthodologie générale des évaluations de sûreté à long terme.*
- *Affinement de cette méthodologie, avec, en particulier, une amélioration de la méthodologie de développement des scénarios, une révision des FEPS à prendre en considération et une meilleure définition des échelles de temps pendant lesquelles les différents éléments du système de dépôt et de son environnement peuvent être considérés comme robustes.*
- *Affinement des modèles utilisés pour l'évaluation de la sûreté à long terme, en particulier en ce qui concerne les aspects d'abstraction et de simplification du système de dépôt et en ce qui concerne la modélisation de la biosphère dans le scénario d'évolution normale.*
- *Intégration de l'impact des hétérogénéités de l'Argile de Boom et de la zone perturbée par l'excavation sur la migration des radionucléides.*
- *Systématisation de la définition, de la sélection et de l'évaluation des scénarios d'évolution altérée et, en particulier, étude des conséquences sur l'argile et sur*

l'environnement hydrogéologique du dépôt des changements climatiques potentiels (réchauffement, glaciations, etc.).

- *Affinement de la définition et de l'interprétation à donner aux différents indicateurs de sûreté et de protection environnementale, en particulier pour les différentes échelles de temps considérées.*
- *Identification des différents types d'incertitudes restantes et des moyens nécessaires, le cas échéant, à leur réduction et affinement des méthodes nécessaires à leur traitement.*
- *Evaluation de sûreté pour les classes de déchets conditionnés dans du bitume et dans du béton.*
- *Compilation de l'ensemble des arguments qualitatifs et quantitatifs qui supportent indirectement les évaluations de sûreté.*
- *Réévaluation de la chimiotoxicité du système de dépôt à partir d'un inventaire de déchets et d'un ensemble de paramètres de migration actualisés.*
- *Définition des bases d'évaluation de la sûreté opérationnelle nucléaire et conventionnelle et évaluation de cette dernière et du respect des règles de protection environnementale, selon une méthodologie approuvée par les autorités de sûreté.*
- *Etablissement des bases de l'optimisation radiologique (principe ALARA).*

Evaluation globale du système de dépôt et de son environnement

- *Définition des méthodes d'évaluation de la robustesse du système de dépôt et identification et quantification des éléments contribuant à celle-ci.*
- *Elargissement de l'approche par fonctions de sûreté à la sûreté opérationnelle.*

Evaluation des Argiles Yprésiennes

- *Poursuite des études préliminaires relatives aux Argiles Yprésiennes à l'aplomb de la zone nucléaire de Doel, en se focalisant sur ses spécificités comme la présence d'eau salée (influence sur la corrosion des métaux et le confinement, la spéciation et la migration des radionucléides), sa faible résistance mécanique (influence sur les possibilités de construction), sa faible conductivité thermique et la présence de voies préférentielles de migration. (Le niveau de connaissance à atteindre est évidemment bien moindre que pour l'Argile de Boom, puisqu'il s'agit d'une première évaluation du potentiel de ces argiles comme formation-hôte.)*

Evaluation des coûts et financement

- *Affinement de la procédure d'estimation des marges d'incertitude technologique et de projet et application aux différentes classes de déchets du groupe géologique au fur et à mesure que les architectures de dépôt pour chacune de ces classes deviennent suffisamment fiables, puis révision des évaluations à intervalles réguliers ou selon les besoins.*

Assurance de la qualité

- *Certification selon la norme iso 9001–2000 des activités de gestion de la recherche et développement après y avoir intégré les recommandations de l’AIEA.*

6.2.3 Les prochaines étapes

La mise en dépôt en profondeur des déchets radioactifs des catégories B et C au sein d’argiles peu indurées constitue un projet innovant à de nombreux points de vue et doit dès lors parcourir l’ensemble des étapes caractéristiques d’un projet de ce type : recherche fondamentale, recherche méthodologique, recherche appliquée, expérience de démonstration, études d’avant-projet, demandes d’autorisation, phase pilote, mise en œuvre, etc. Le programme actuel doit être poursuivi de façon à rendre ses différents aspects — compréhension, conception et évaluation — cohérents et à les amener au niveau de maturité approprié, de manière à pouvoir passer progressivement de la phase de recherche et développement méthodologique à la phase d’avant-projet, l’expérience de démonstration PRACLAY servant de charnière entre ces deux phases (fig. 6.2). Cette expérience (1995–2015), qui se focalise sur la démonstration directe de la faisabilité et non sur l’évaluation de la sûreté à long terme, par nature indirecte, a deux objectifs fondamentaux :

- permettre de se prononcer avec confiance sur la faisabilité technique des options retenues en matière d’architecture, dans l’état des technologies actuelles (rôle de *confiance* dans la faisabilité). L’installation de l’expérience in situ confirmera une partie non négligeable de la faisabilité de l’architecture proposée.
- conforter les résultats obtenus par les travaux de recherche et développement (rôle d’*étayement* de la confiance dans les modèles, leurs hypothèses de base et leurs prédictions). Les résultats finaux de cette expérience serviront donc à resserrer les plages de fonctionnement des différents composants du système de dépôt et apporteront de précieuses informations dans le cadre de l’exercice d’affinement et d’optimisation des architectures qui fera l’objet de la phase d’avant-projet.

Au terme de l’installation in situ de l’expérience PRACLAY et de l’observation des premières années de fonctionnement, le niveau de confiance dans la faisabilité de la solution étudiée devrait être suffisant pour établir, vers 2010, un premier *Dossier de sûreté et de faisabilité* relatif à la mise en dépôt final des déchets des catégories B et C au sein d’argiles peu indurées. Contrairement aux rapports de type SAFIR, qui couvrent une période définie arbitrairement et qui s’inscrivent dans un processus de recherche et développement méthodologique, ce dossier sera entièrement autonome. Il constituera la base des itérations successives en matière de faisabilité et de sûreté et résultera d’une concertation scientifique et technique avec les autorités de sûreté nucléaire belges, concertation qui débutera sur la base du rapport SAFIR 2. Outre les recommandations sur les travaux encore à finaliser en matière de recherche et développement méthodologique ainsi que sur la préparation de la phase d’avant-projet, ce premier dossier se prononcera sur les aspects suivants :

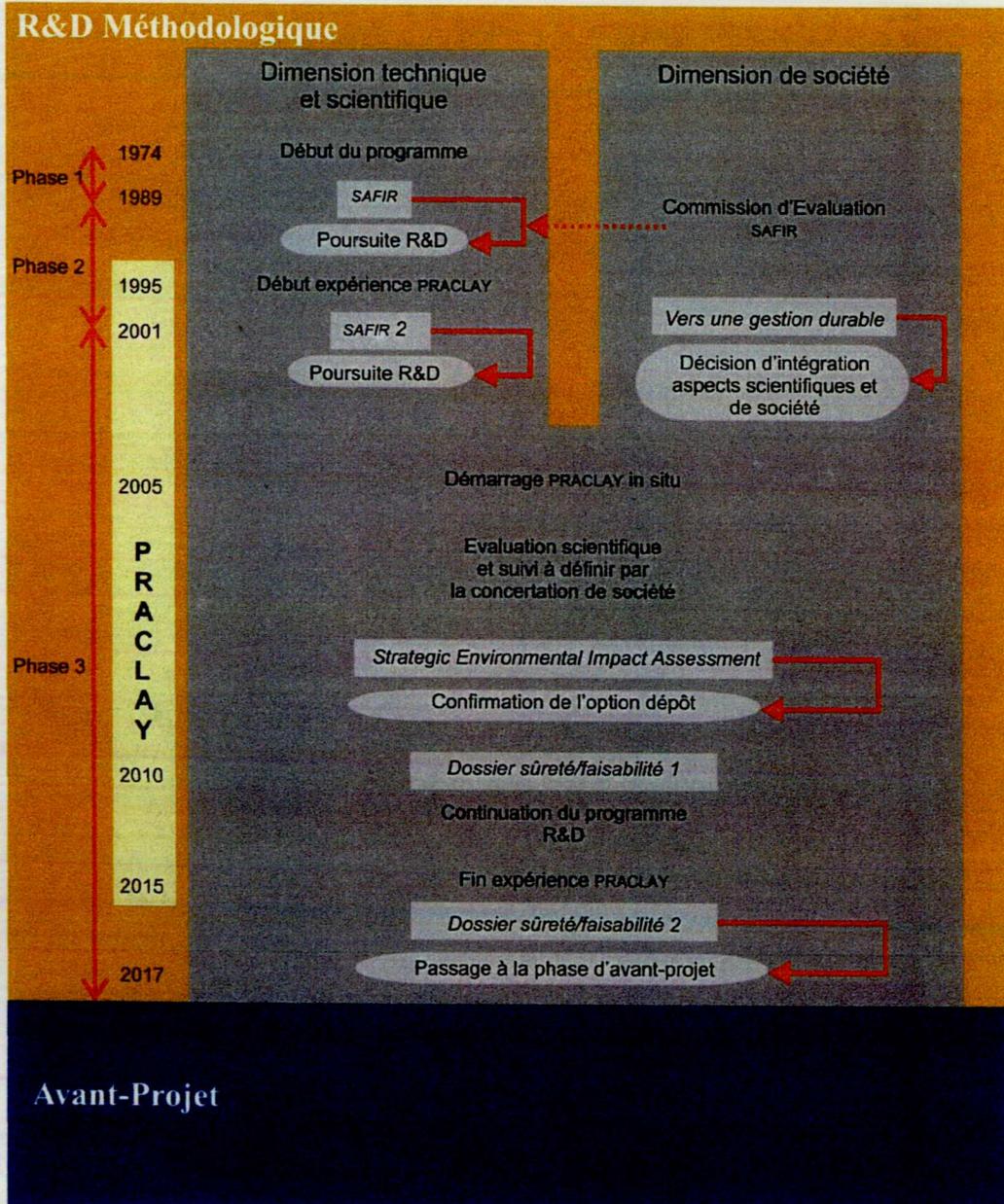


Figure 6.2 Schéma de principe des différentes étapes du programme en matière de dépôt en profondeur au sein de l'Argile de Boom tel que proposé par l'ONDRAF (sans préjuger des décisions qui seront effectivement prises en la matière).

pour l'Argile de Boom à Mol-Dessel :

- les arguments supportant, d'une part, une compréhension appropriée du site et du système de dépôt et, d'autre part, l'évaluation de la sûreté ;
- la faisabilité de l'architecture, en ce compris les possibilités de récupération et de contrôle ;
- la sûreté conventionnelle et radiologique ainsi que la protection environnementale durant les différentes phases du dépôt ;

pour les Argiles Yprésiennes à Doel :

- le potentiel, en termes de faisabilité et de sûreté, des Argiles Yprésiennes ;
- la transférabilité des connaissances relatives à l'Argile de Boom ;
- l'intérêt et les objectifs d'une installation souterraine de caractérisation éventuellement à construire et à exploiter après la phase de recherche et développement méthodologique.

Au terme de l'expérience de démonstration PRACLAY, un deuxième *Dossier de sûreté et de faisabilité* fera le point, vers 2017, sur l'entièreté des résultats obtenus, et en particulier sur les aspects qui confortent la confiance dans les modèles et dans leurs prédictions. C'est sur ce deuxième dossier que pourrait se fonder la décision de mettre fin à la phase de recherche et développement méthodologique et d'entamer la phase d'avant-projet. Celle-ci visera notamment à qualifier le système de dépôt final proposé pour l'ensemble des déchets concernés et ce, pour une formation-hôte spécifique et un site spécifique à définir. Elle comprendra l'établissement d'une description générale et d'une justification des différents éléments de l'architecture de dépôt (caractéristiques, géométrie, techniques de construction, techniques d'exploitation, méthodes de qualification, etc.), description et justification qui se fonderont nécessairement sur les résultats d'une démarche préalable d'optimisation technique, économique et radiologique (ALARA). Une telle phase d'avant-projet (de même que les phases de mise en œuvre du dépôt en profondeur) devra être supportée par une série de travaux de recherche et développement complémentaires. Il s'agira notamment de confirmer les prévisions faites et de s'adapter aux situations réelles rencontrées en souterrain et aux déchets effectivement à mettre en dépôt, en d'autres mots d'assurer la flexibilité nécessaire à la réalisation d'un tel projet.

Comme il est évident que la problématique de la gestion à long terme des déchets radioactifs doit être considérée dans un cadre plus large que strictement technico-scientifique, il sera nécessaire, dans le programme futur de l'ONDRAF, de mieux intégrer les aspects de société et économiques aux aspects technico-scientifiques. Un tel programme interdisciplinaire, où se rencontrent sciences pures, appliquées et humaines, devra être structuré afin de supporter le processus décisionnel en matière de gestion à long terme des déchets radioactifs sur une base la plus large possible. Il fait l'objet du document *ONDRAF Vers une gestion durable des déchets radioactifs* qui accompagne le rapport SAFIR 2. En support à cette intégration qu'il souhaite, l'ONDRAF se propose d'établir un document de type *Strategic Environmental Impact Assessment* afin d'aider à l'évaluation des alternatives de gestion à long terme compte tenu de leurs effets environnementaux respectifs.

6.3 L'évaluation de la confiance

La confiance résulte d'un jugement positif qui se fonde principalement sur un argumentaire qualitatif relatif à la compréhension et à la connaissance acquises quant aux FEPS qui déterminent le fonctionnement et l'évolution d'un système donné. Elle a un caractère éminemment relatif puisque le niveau à atteindre dépend des décisions qui doivent être prises. Dans le cas présent, il est évident que le niveau de confiance à atteindre pour obtenir une décision de poursuite des activités de recherche et développement méthodologique doit être moindre que celui qui devra être atteint pour une demande d'autorisation d'exploitation d'une installation de dépôt.

En matière de dépôt final, la confiance dans la sûreté et la faisabilité repose sur trois types de considérations :

- l'identification des acquis et des questions ouvertes ;
- l'évaluation de l'importance relative des incertitudes restantes ;
- la définition et la description des efforts à mettre en œuvre pour pouvoir réduire suffisamment les incertitudes qui ont le plus d'influence sur la sûreté.

L'analyse détaillée de toutes les connaissances techniques et scientifiques acquises, des incertitudes qui subsistent et de leur influence sur la confiance que l'on peut accorder au bon fonctionnement du système de dépôt étudié, ainsi que l'analyse des moyens à mettre en œuvre pour combler les lacunes qui subsistent permet à l'ONDRAF d'affirmer que l'option de dépôt en profondeur au sein d'une argile peu indurée reste à l'heure actuelle, et pour les déchets considérés dans le rapport SAFIR 2, une option tout à fait envisageable. La prochaine (troisième) phase du programme de recherche et développement méthodologique, élargie par intégration des volets social et économique, devra permettre de renforcer davantage la confiance acquise, en se focalisant sur les questions ouvertes et les incertitudes restantes. Cette appréciation globale du niveau de confiance découle des réponses que l'on est en mesure de donner aux six questions suivantes.

Est-on capable de concevoir et de réaliser un système de dépôt en profondeur pour les déchets des catégories B et C ?

Des avancées importantes ont été réalisées en matière de conception d'un système de dépôt en profondeur et des acquis significatifs ont été engrangés en ce qui concerne l'excavation, la construction et l'exploitation d'installations souterraines au sein d'une argile peu indurée à une profondeur de l'ordre de 220 mètres. A côté de cela, le travail de synthèse effectué dans le cadre de la préparation du rapport SAFIR 2 et la préparation de l'expérience de démonstration PRACLAY (et en particulier la réalisation de la maquette OPHELIE) ont permis de mettre en évidence les incertitudes résiduelles et difficultés potentielles liées à la mise en œuvre concrète de l'architecture de dépôt de référence.

La confiance dans la capacité de lever les incertitudes et difficultés identifiées au cours de la prochaine phase du programme repose sur les éléments suivants :

- l'existence d'une méthodologie systématique et systémique de conception, que l'ONDRAF a développée en concertation avec des gestionnaires de déchets à l'étranger et qui repose sur les fonctions de sûreté à remplir par le système de dépôt ;
- les acquis en matière de comportement des matériaux de l'installation de dépôt et la disponibilité industrielle actuelle d'une large gamme de matériaux permettant une flexibilité importante dans les choix (principalement en matière de matériaux de (sur)emballage et de remblayage) ;
- le renforcement, dans le cadre du programme futur, de l'étude des interfaces et interactions entre les différents composants du système de dépôt ;
- le rôle essentiel que jouera l'expérience de démonstration PRACLAY, et ce tant en termes de confirmation de la faisabilité que d'étayement des modèles et de transition vers une phase d'avant-projet ;
- les connaissances techniques et industrielles déjà obtenues dans les programmes de mise en dépôt en profondeur réalisés à l'étranger ;
- les développements technologiques et les acquis de ces vingt dernières années en matière de construction d'installations souterraines dans des argiles peu indurées, qui laissent présager la possibilité d'améliorations futures.

Est-on capable de caractériser le système de dépôt envisagé et comprend-on son comportement ?

La compréhension globale du fonctionnement du système de dépôt telle que définie sur base des connaissances acquises, de la définition et de l'application des fonctions de sûreté et des résultats des évaluations de sûreté à long terme a progressé de manière satisfaisante. L'importance primordiale de la fonction de sûreté de retard et d'étalement du relâchement, qui est principalement assurée par la barrière naturelle (l'Argile de Boom), a clairement été confirmée. De là le rôle central attribué à la caractérisation de la formation-hôte et à l'évaluation de toutes les modifications et perturbations de cette dernière (voir aussi encadré à la fin de cette section).

Dans ce cadre, la caractérisation de la barrière argileuse a fortement progressé suite à l'adaptation de méthodes éprouvées de caractérisation géologique, hydrogéologique, géomécanique et géochimique aux besoins spécifiques de la reconnaissance d'une formation argileuse peu indurée.

La connaissance des phénomènes et processus qui contrôlent la migration des radionucléides critiques au sein de la formation-hôte a bien progressé, en conséquence d'un programme de recherche multifacette (approches expérimentales diverses tant en laboratoire qu'in situ, étude des radionucléides naturellement présents dans l'Argile de Boom, utilisation de différents modèles conceptuels de migration, large coopération internationale sur le plan

expérimental et conceptuel mais aussi quant à l'établissement de banques de données fiables). Les incertitudes résiduelles, c'est-à-dire celles relatives aux processus de rétention de quelques radionucléides critiques, semblent pouvoir être levées au moyen des méthodes de recherche disponibles.

L'impact d'une perturbation mécanique et chimique de l'Argile de Boom suite à l'excavation et à la construction des installations souterraines reste un des points cruciaux du programme futur. La démonstration directe de la possibilité d'utiliser des techniques de creusement industrielles minimisant les perturbations ainsi que la caractérisation et la compréhension de l'évolution dans le temps de ces perturbations constituent à cet égard des questions clés.

Par ailleurs, la confiance dans la capacité à caractériser des phénomènes liés à la génération, à l'accumulation et à la migration de gaz au sein d'un système de dépôt situé dans une argile peu perméable est élevée, car elle a été développée dans un cadre international. Il est en outre possible de modifier l'architecture des installations de dépôt afin d'éviter des surpressions localisées de gaz.

La garantie de la fonction de sûreté de confinement physique au moyen d'un (sur)emballage métallique résistant à la corrosion semble un but atteignable et ce, d'autant plus qu'une marge importante existe en ce qui concerne la prévention de la corrosion. Cette prévention pourrait se faire en optant pour des alliages plus nobles que le matériau de référence actuel et/ou en assurant des conditions géochimiques favorables dans le milieu environnant. Le programme futur devra être renforcé par un examen systématique de tous les types de corrosion pour les matériaux métalliques envisagés. En outre, la rétention des radionucléides sur les produits de corrosion des matériaux métalliques (oxydes et hydroxydes de fer), connus pour leur forte capacité de sorption, n'a pas encore été considérée et est susceptible de réduire les relâchements hors du champ proche, y compris en cas de défaillance précoce de la capacité de confinement du (sur)emballage.

Est-on capable d'extrapoler dans le temps et dans l'espace les valeurs des paramètres relatifs au système de dépôt ?

La problématique de l'extrapolation tant spatiale que temporelle des paramètres de la barrière naturelle et des barrières ouvragées est, et restera toujours, centrale à toute l'évaluation de la sûreté à long terme d'un dépôt. Afin de pouvoir apprécier cette problématique, il faut d'abord connaître la nature des processus et phénomènes qui déterminent le comportement et l'évolution des barrières ainsi que les facteurs perturbateurs.

Migration des radionucléides à travers la barrière naturelle Comme cette migration est contrôlée par la diffusion, seule l'extrapolation dans le temps représente un problème, l'extrapolation spatiale pouvant être approchée par un échantillonnage représentatif de l'Argile de Boom. Ainsi, il faudra pouvoir démontrer la stabilité géochimique et physique de la formation-hôte sur de longues périodes. Plusieurs arguments sont en faveur d'une telle stabilité (capacité d'autocicatrisation et de tamponnage chimique, établissement rapide après la sédimentation des conditions géochimiques rencontrées actuellement, etc.). La

confirmation de ces arguments et, le cas échéant, d'autres arguments semble à portée d'étude, notamment via des analyses géoprospectives et la poursuite de la caractérisation du comportement des radionucléides naturellement présents dans l'Argile de Boom. En outre, la conclusion relative à l'absence de mouvement advectif significatif au sein de l'Argile de Boom devrait être renforcée par l'étude de la conductivité hydraulique en grand (via des failles à l'échelle régionale) de l'argile et des écoulements potentiels dans les bandes à granulométrie plus grossière. Ceci devrait aussi permettre une extrapolation des données acquises aux échelles centimétriques, métriques et décamétriques, qui indiquent des valeurs de conductivité hydraulique cohérentes.

Durabilité du (sur)emballage L'extrapolation temporelle est ici aussi primordiale, puisque l'étanchéité de cette barrière doit être assurée sur des périodes de plusieurs centaines à plusieurs milliers d'années. Pour ce faire, il faudra prendre des marges de sécurité suffisantes vis-à-vis des scénarios de corrosion, par exemple en surdimensionnant (épaisseur, qualité) le (sur)emballage en fonction des environnements corrosifs et des phénomènes de corrosion attendus.

Durabilité des matrices de déchets L'extrapolation temporelle est ici encore primordiale. Une telle extrapolation a été possible parce que les mécanismes de dégradation de la matrice de verre dans un environnement argileux sont bien connus. La faible conductivité hydraulique de l'argile permet de considérer le système comme statique, où les processus de diffusion contrôlent les vitesses de lixiviation. En outre, il ressort des évaluations de sûreté à long terme que l'influence de la durabilité des matrices est en grande partie éclipsée par la performance de l'Argile de Boom. Une matrice stable constitue donc une réserve de sûreté. Une amélioration de la connaissance des mécanismes de dégradation des combustibles usés est néanmoins souhaitable, mais pourra se fonder sur l'expérience considérable acquise en la matière à l'étranger.

Faisabilité En ce qui concerne l'extrapolation spatiale de l'aspect faisabilité technique, l'expérience de démonstration PRACLAY apportera une contribution très importante à la confirmation de la connaissance et de la confiance actuelle dans les caractéristiques des divers composants du système de dépôt.

Les **analogues naturels** n'ont été que peu utilisés jusqu'ici, bien qu'une synthèse de leurs applications au cas d'un dépôt dans des argiles peu indurées ait été rédigée. D'une manière générale, ils permettent de renforcer la confiance dans les qualités intrinsèques des argiles comme barrières naturelles, comme illustré notamment par les résultats des études d'analogies naturelles suivantes :

- *confinement physique* L'argile a protégé de la dégradation des matières aussi biodégradables que les bois fossiles quaternaires de Dunarobba ou les bois fossiles miocènes de l'Entre-Sambre-et-Meuse. Des fragments de verre volcanique oligocène ont par ailleurs été retrouvés dans l'Argile de Boom. Ils ne présentent pas de figures de dissolution, malgré un enfouissement de près de 30 millions d'années. La persistance de ces verres volcaniques dans l'Argile de Boom fournit une indication complémentaire de la stabilité de matériaux vitreux dans cet environnement.

- *rétenion* L'argile en général possède une bonne aptitude à fixer chimiquement les radionucléides, comme le montrent des analogues naturels tels que celui d'Alligator Rivers ou des poches de dissolution de l'Entre-Sambre-et-Meuse, et mettent surtout en lumière sa capacité à fixer efficacement des minéraux accessoires riches en polluants, néoformés à l'interface fluides-solides. Cette capacité de fixation est commune à plusieurs matériaux naturels caractérisés par une surface spécifique élevée.
- *résistance à l'altération géochimique* L'Argile de Boom contient des carbonates et un assemblage pyrite/sidérite qui tamponneraient l'acidité et le caractère oxydant d'éventuels fluides percolants. L'étude de différentes occurrences belges d'argiles ayant subi des altérations acides ou une oxydation importante montre que les associations minérales résultantes présentent des surfaces spécifiques élevées et donc de grandes capacités de piégeage.

Est-on capable d'évaluer la sûreté d'un dépôt en profondeur ?

La méthodologie d'évaluation de la sûreté à long terme est fondée sur un large consensus international. Les évaluations de sûreté successives effectuées dans le programme belge durant la période 1985–2000 donnent une image cohérente des caractéristiques ou processus qui déterminent la sûreté du système de dépôt étudié, de l'importance relative des différentes incertitudes et de la part des radionucléides critiques dans l'impact radiologique global. Ceci nonobstant l'utilisation de modèles conceptuels et numériques fortement différents au cours du temps.

La confiance dans cette méthodologie pourra être renforcée dans le futur en étoffant ses fondements scientifiques (par exemple au moyen d'examen internationaux et d'interactions plus intenses avec le monde académique) et en améliorant sa transparence et sa traçabilité, notamment en y renforçant la cohérence des modèles, hypothèses, données et conditions aux limites, ainsi qu'en y incluant les éléments nécessaires d'assurance de la qualité et de gestion des connaissances.

L'utilisation d'indicateurs de sûreté autres que la dose et le risque semble prometteuse, mais il sera nécessaire de développer plus avant les points de comparaison et de jugement.

Le système de dépôt étudié est-il sûr ?

Tous les calculs effectués pour le scénario d'évolution normale indiquent que le dépôt étudié est sûr en termes radiologiques. L'impact radiologique calculé pour un individu du groupe de référence est en effet systématiquement et nettement inférieur à la contrainte de dose. Les premiers résultats des évaluations de sûreté quantitatives ou qualitatives effectuées pour les scénarios d'évolution altérée montrent la robustesse du système de dépôt considéré : malgré les importantes perturbations du système supposées dans chacun des scénarios d'évolution altérée, sa performance globale reste largement intacte. La confiance dans les résultats des évaluations de sûreté est relativement grande pour plusieurs types de raisons :

- *emploi systématique d'hypothèses conservatives*, et donc constitution de réserves de sûreté (fig. 2.6 et table 6.1). En effet, les évaluations de sûreté
 - sous-estiment sans doute fortement la durée de vie des barrières ouvragées et, en particulier, de la matrice de verre ;
 - négligent largement le rôle des barrières ouvragées autres que le (sur)emballage ;
 - négligent le fait que la sorption des radionucléides sur les produits de corrosion du (sur)emballage et des autres matériaux métalliques peut fortement ralentir la migration ;
 - utilisent un groupe de référence dont le mode de vie supposé est très pénalisant pour l'évaluation de l'impact radiologique.
- *présence de nombreux éléments de robustesse* dans le système de dépôt :
 - redondance élevée dans les fonctions de sûreté et dans les rôles attribués aux différentes barrières ;
 - éléments liés à l'argile : propriétés autocicatrisantes, relative simplicité de la migration des radionucléides et surtout de celle des radionucléides non retardés ;
 - éléments liés aux barrières ouvragées : conception des installations de dépôt visant la simplicité, ce qui autorise notamment une modélisation plus aisée du champ proche ; emploi d'un (sur)emballage, ce qui évite de devoir tenir compte de complications thermiques lors de la lixiviation et de la migration des radionucléides ; barrières ouvragées qui préservent l'argile des phénomènes de radiolyse ;
 - forte insensibilité des performances du système aux modèles retenus pour la dégradation des matrices de déchets ;
 - limitation du flux des actinides à l'interface champ proche / champ lointain résultant de leurs faibles solubilités, ce qui rend l'impact radiologique indépendant de leur inventaire et des incertitudes qui l'entourent.
- *emploi de différents types d'indicateurs de sûreté*, qui permet d'évaluer l'impact radiologique selon des approches différentes et complémentaires. Les flux et les concentrations de radionucléides à l'interface entre l'Argile de Boom et les aquifères sont comparables à l'activité alpha naturellement présente (U, Ra et Th) tant dans l'Argile de Boom que dans les aquifères sus-jacents.
- *cohérence des résultats obtenus depuis le début du programme*, ceci malgré les évolutions importantes en ce qui concernent les données, concepts, modèles et codes utilisés.

Comprend-on bien l'importance relative des différents types d'incertitude dans les évaluations de sûreté ?

L'importance relative des différents types d'incertitude dans les évaluations de sûreté à long terme est aujourd'hui bien mieux cernée grâce au programme scientifique et aux évaluations de sûreté, mais surtout suite à une considération du système de dépôt dans sa globalité. Afin d'améliorer la confiance dans cet aspect, une interaction renforcée avec le monde académique et scientifique au sens large est envisagée.

Caractéristiques majeures et principales questions ouvertes concernant l'Argile de Boom en tant que formation-hôte à l'aplomb de la zone nucléaire de Mol-Dessel

Simplicité, homogénéité, uniformité

- Bassin sédimentaire récent, peu tectonisé, avec couches quasi horizontales.
- Très bonne continuité latérale.
- Bonne homogénéité verticale relative en ce qui concerne les paramètres de migration (radionucléides peu ou non retardés).
- Absence de voies préférentielles de migration.

Géométrie

- Etendue suffisante pour y installer un dépôt en dehors des zones affectées par les failles.
- Profondeur n'excluant pas les risques d'intrusion humaine au sein de l'installation de dépôt. L'architecture de l'installation de dépôt présente cependant une bonne robustesse en cas d'intrusion.
- Epaisseur réduite imposant une minimisation de l'emprise verticale du dépôt et des perturbations induites, de manière à maximiser l'épaisseur de la barrière naturelle.

Stabilité mécanique

- Région considérée comme faiblement sismique. *Une réévaluation du risque sismique est en cours en raison de la présence d'une structure tectonique active majeure, le Graben de Roermond, en bordure orientale.*
- Capacité de tampon mécanique (plasticité) en cas de séisme.
- Activité géothermique à grande profondeur, non représentative d'une activité volcanique ou magmatique.
- Profondeur suffisante pour s'affranchir des phénomènes érosifs.
- Capacité d'autocicatrisation à long terme (*à confirmer*) des fractures induites par excavation ou par surpression gazeuse.
- La compréhension fine du comportement thermo-hydro-mécanique doit être améliorée.*

Possibilité de construction

- Possibilité de construction de puits et de galeries démontrée par la construction du laboratoire souterrain HADES. *La démonstration d'une méthode industrielle de creusement de galeries est prévue (PRACLAY).*
- Nécessité d'un soutènement rapide des excavations afin de limiter les perturbations induites et nécessité de galeries de section circulaire.
- Fissuration induite lors du creusement (second puits). *L'origine et le comportement de ces fissures font l'objet d'une étude approfondie.*
- Tenue des galeries inconnue sur de longues périodes opérationnelles (récupérabilité).
- Conductivité thermique assez faible, entraînant un risque d'augmentation importante de température dans le système de dépôt et son environnement.

Hydrogéologie

- Conductivité hydraulique très faible.
- Gradient hydraulique descendant et faible au travers de l'Argile de Boom.
- Advection négligeable. *La possibilité d'écoulement advectif au sein de la double bande silteuse ou en présence de failles à l'échelle régionale doit encore être évaluée.*
- Faible capacité de dissipation des gaz potentiellement produits dans l'installation de dépôt.

.../...

Géochimie et hydrogéochimie

- Migration des espèces en solution contrôlée par diffusion.
- Conditions légèrement alcalines et fortement réductrices limitant la solubilité et la mobilité de nombreux radionucléides.
- Capacité de rétention élevée pour les radionucléides. Les mécanismes de rétention de certains radionucléides ne sont toutefois pas encore totalement compris.
- Quasi-immobilité sur des temps géologiques de l'uranium et du thorium naturellement présents.
- Importante teneur en matière organique, principalement immobile car liée aux minéraux argileux, et induisant une forte rétention des actinides et lanthanides trivalents par sorption.
- *L'impact possible de la matière organique en solution et mobile sur la migration des radionucléides est en cours d'étude. L'influence de cet accroissement potentiel de mobilité sur l'impact radiologique est probablement limitée.*
- Pas de migration des radionucléides associée aux colloïdes (ultrafiltration).
- Bonne homogénéité d'une grande partie de la Formation de Boom en ce qui concerne les propriétés de migration des radionucléides non ou peu retardés.
- Système géochimiquement à l'équilibre montrant une capacité de tampon pH et rédox importante, de sorte que la présence d'un dépôt ne devrait engendrer que peu de modifications géochimiques. *Cependant l'évolution géochimique naturelle et induite à long terme de l'argile est encore à étudier.*
- Conditions favorables à une très faible corrosion anaérobie généralisée pour les aciers inoxydables classiques.
- Possibilité de génération de thiosulfates et de sulfates par radiolyse ou par oxydation (risque accru de corrosion par piqûres des aciers) et peu de modifications géochimiques (et minéralogiques) suite à une irradiation importante et un chauffage prolongé.
- Présence de pyrite susceptible de créer localement des conditions géochimiques pénalisantes pour la corrosion des métaux suite à son oxydation.
- Présence de bactéries méthanogènes mais activité microbiologique actuelle limitée dans l'argile en conditions naturelles in situ. *L'influence d'une activité microbiologique induite par contamination sur les barrières ouvragées reste à étudier.*

Environnement et risque d'intrusion humaine

- Présence d'aquifères (notamment celui du Néogène, qui représente une réserve d'eau potable très importante), constituant une contrainte significative. *Les conséquences de l'impact thermique sur les aquifères doivent être évaluées plus en détail.*
- Forte capacité de dilution de l'aquifère du Néogène.
- Présence de glauconie dans les sables sus-jacents (sorbant potentiel).
- *La sensibilité des conditions hydrogéologiques et hydrogéochimiques actuelles aux changements climatiques doit être analysée.*
- Absence de risque d'exploitation de l'argile, dans la mesure où elle est disponible en grande quantité en surface.
- Faible risque d'intrusion en vue d'une exploitation de l'aquifère inférieur, peu productif et fortement salé.
- Ressources en sous-sol à l'échelle de la Campine (géothermie et gazéification).

Modélisation

- Modélisation facilitée par la simplicité relative de la géométrie et l'homogénéité des couches géologiques.
- Possibilité de modéliser la migration au moyen d'un nombre limité de paramètres.
- Milieu géochimiquement homogène.

Postface

En publiant le rapport SAFIR 2, l'ONDRAF a mis à la disposition de son ministre de tutelle et des différents acteurs concernés un document leur permettant d'évaluer les progrès réalisés au cours de la période 1990–2000 du point de vue de la faisabilité et de la sûreté d'une solution possible de gestion à long terme des déchets radioactifs des catégories B et C, à savoir leur mise en dépôt en profondeur dans une couche argileuse peu indurée en Belgique. Les travaux réalisés au cours de cette période s'inscrivaient dans le cadre de la deuxième phase de son programme de recherche et développement méthodologique et concernaient principalement l'Argile de Boom à l'aplomb de la zone nucléaire de Mol–Dessel en tant que formation-hôte et site de référence et, dans une bien moindre mesure, les Argiles Yprésiennes à l'aplomb de la zone nucléaire de Doel, comme formation-hôte et site alternatifs. Ces travaux d'ordre méthodologique n'impliquent en rien qu'une décision de localisation pour la mise en œuvre de la solution étudiée ait été prise. Ils bénéficient des résultats acquis dans le cadre de la construction et de l'exploitation du laboratoire souterrain de recherche HADES à Mol.

Le programme de recherche et développement de l'ONDRAF a pris en compte la plupart des recommandations de la commission qui avait été créée pour évaluer le rapport SAFIR (1990). Il n'a par contre pu tenir que partiellement compte de ses recommandations relatives à la compatibilité globale des déchets avec le système de dépôt et à l'acquisition du niveau de connaissance nécessaire de l'inventaire des déchets en vue de leur mise en dépôt final effective.

L'ensemble des acquis de la recherche ne met, pour le moment, en évidence aucun problème à caractère réhibitoire concernant la mise en dépôt dans l'Argile de Boom des déchets vitrifiés de haute activité et de longue durée de vie, ce qui renforce la confiance dans la solution étudiée. Ceci confirme que le dépôt au sein d'une argile peu indurée reste, pour les déchets considérés dans le rapport SAFIR 2, une option tout à fait envisageable. Les travaux de recherche et développement méthodologique effectués ont principalement permis d'établir une confiance significative en les qualités de l'Argile de Boom en tant que barrière naturelle, en la durabilité du verre en tant que matrice de conditionnement, en la possibilité de creuser les installations souterraines nécessaires ainsi qu'en la méthodologie d'évaluation de la sûreté radiologique à long terme. Ces travaux confortent aussi les résultats favorables des évaluations, en particulier en ce qui concerne le rôle primordial pour la sûreté à long terme de la formation-hôte, et donc l'importance de connaître et contrôler les perturbations y induites, et confirment la dominance des radionucléides non ou peu retardés (^{129}I , ^{36}Cl , ^{79}Se , ^{126}Sn , ^{14}C) dans l'impact radiologique, radionucléides pour lesquels la connaissance de la migration au sein de l'argile peut généralement être considérée comme adéquate. En outre, ils ont permis de mettre en évidence, au cours de la préparation de l'expérience de démonstration in situ en vraie grandeur PRACLAY, les difficultés pratiques liées à la mise en œuvre de l'architecture de référence pour le dépôt et à la bonne maîtrise des interactions entre ses différents composants.

Cependant, sans remettre en cause le choix de base de l'Argile de Boom, suffisamment de questions restent ouvertes à l'heure actuelle pour qu'il soit prématuré de se prononcer de façon décisive sur la faisabilité technique d'un dépôt dans cette formation-hôte, sur la sûreté opérationnelle et à long terme d'un tel dépôt ou sur son respect des normes environnementales. Il en est a fortiori de même pour les Argiles Yprésiennes. En ce qui concerne l'Argile de Boom, la troisième phase du programme de recherche et développement méthodologique de l'ONDRAF devrait considérer les priorités suivantes :

- démonstration de la faisabilité de la mise en œuvre des installations de dépôt ;
- affinement de la compréhension des processus de rétention des radionucléides opérant dans l'Argile de Boom et de l'évolution des propriétés de rétention de cette formation ;
- analyse des hétérogénéités et des discontinuités de l'Argile de Boom et de leurs conséquences sur les écoulements et sur la migration des radionucléides ;
- analyse de l'influence sur les écoulements au sein de l'Argile de Boom de modifications des conditions hydrogéologiques régionales au sein des aquifères encaissants ;
- étude plus poussée des aspects de compatibilité chimique, biologique et physique de l'ensemble des matériaux mis en présence avec la formation-hôte et des différentes perturbations induites par les diverses classes de déchets ;
- révision du choix du matériau pour le (sur)emballage et développement d'une approche intégrée de la définition des barrières ouvragées basée sur la prévention de la corrosion du (sur)emballage ;
- systématisation et systémisation de la conception des installations de dépôt pour toutes les classes de déchets, en particulier pour les classes les plus pénalisantes ;
- analyse des conséquences sur le dépôt final, la formation-hôte et la sûreté de la génération de gaz par les déchets (principalement ceux de catégorie B) et des réponses conceptuelles qui peuvent y être apportées ;
- étude et démonstration des méthodes permettant de caractériser les déchets, ainsi que de vérifier et de confirmer leur composition et leur dégagement de chaleur, la nature et l'ampleur de ces opérations devant être proportionnées aux exigences de connaissance des déchets en vue de leur mise en dépôt en profondeur ;
- amélioration de la méthodologie d'évaluation de la sûreté à long terme, notamment en ce qui concerne l'identification et le traitement des incertitudes ainsi que les indicateurs de sûreté et de performance alternatifs, et définition d'indicateurs de robustesse ;
- définition et développement d'un système de gestion et de transfert à long terme des connaissances permettant notamment une traçabilité des décisions prises et des choix techniques effectués, la transmission des informations multidisciplinaires, leur intégration et leur synthèse.

La conclusion de ces travaux futurs et les informations relatives à la faisabilité de l'architecture de dépôt qui proviendront de l'installation in situ de l'expérience de démonstration PRACLAY permettront d'établir, vers 2010, une première itération d'un *Dossier de sûreté et de faisabilité* sur la mise en dépôt final des déchets des catégories B et C au sein d'argiles peu indurées. Au terme de l'expérience PRACLAY, une deuxième itération du *Dossier de sûreté et de*

faisabilité sera nécessaire de manière à exploiter l'entièreté des résultats obtenus et, en particulier, les aspects propres à étayer la confiance dans les modèles et leurs prédictions. Cette deuxième itération, prévue vers 2017, constituerait le support à la décision de mettre fin à la phase de recherche et développement méthodologique et d'entamer la phase d'avant-projet qui est, elle, spécifique à une formation-hôte et un site encore à désigner.

Cependant, la problématique de la gestion à long terme des déchets radioactifs devant être considérée dans un cadre plus large que strictement technico-scientifique, il conviendra aussi d'intégrer dans le programme futur de l'ONDRAF les aspects de société et économiques, et ce afin de supporter un processus décisionnel en la matière. Un tel processus impliquant la considération des alternatives de gestion à long terme ainsi que la prise en compte de l'ensemble des impacts environnementaux de la solution proposée, l'ONDRAF propose d'établir des documents du type *Strategic Environmental Impact Assessment* et du type *Rapport sur les effets environnementaux pour une installation ou un projet donné*. Dans ce cadre, la poursuite des travaux sur les Argiles Yprésiennes, en tant que formation-hôte alternative, est recommandée, mais le niveau de connaissances à atteindre pour celles-ci ne doit pas actuellement égaler celui qui a été atteint pour l'Argile de Boom. Ce niveau de connaissances doit néanmoins permettre d'établir si les Argiles Yprésiennes constituent une option réaliste en tant que telle ou en complément à l'option de référence.

L'établissement d'un programme interdisciplinaire de recherche et développement intégrant les aspects fondamentaux, appliqués et relatifs aux sciences humaines, en accord avec les priorités susmentionnées, permettra de renforcer davantage la confiance acquise dans la solution étudiée, notamment par la considération des alternatives de gestion, le développement concret d'architectures de dépôt, la réduction des incertitudes, la prise en compte des impacts non radiologiques et la considération des aspects de société.



Annexes

A.1 Figures, tables et encadrés

	page
Figures	
1.1	1.5
Approche générale suivie dans le cadre du programme belge de recherche et développement méthodologique relatif au dépôt final en profondeur.	
2.1	2.1
Les options envisageables pour la gestion à long terme des déchets radioactifs.	
2.2	2.3
Les principales phases de la réalisation progressive d'un système de dépôt final.	
2.3	2.6
Exposition annuelle moyenne aux rayonnements ionisants en Belgique.	
2.4	2.4
Schéma de principe d'une installation de dépôt final en profondeur et terminologie associée.	
2.5	2.5
Les fonctions de sûreté à long terme du système de dépôt final en profondeur étudié en Belgique qui sont considérées dans les évaluations de sûreté à long terme dans le cas du scénario d'évolution normale.	
2.6	2.12
Les quatre phases de l'évolution normale d'un système de dépôt en profondeur et les fonctions de sûreté à long terme correspondantes.	
3.1	3.5
La classification des déchets radioactifs conditionnés en Belgique.	
3.2	3.14
Localisation des zones nucléaires de Mol-Dessel et de Doel.	
3.3	3.16
Localisation des principaux forages et campagnes de reconnaissances géophysiques sur et autour de la zone nucléaire de Mol-Dessel.	
3.4	3.17
Profil lithostratigraphique de l'Argile de Boom et variations lithologiques.	
3.5	3.18
Vue générale d'une argillère montrant la structure en bandes caractéristique de l'Argile de Boom.	
3.6	3.18
Vue d'un septaria	
3.7	3.19
Profondeur de la base, et épaisseur, de la Formation de Boom.	
3.8	3.20
Coupe géologique à l'aplomb du forage Mol-1.	
3.9	3.21
Imagerie de résistivité à l'aplomb du forage Mol-1 et interprétation.	
3.10	3.26
Détail du signal obtenu par sismique réflexion dans l'Argile de Boom.	
3.11	3.29
Succession schématique des aquifères et aquitards du Tertiaire et du Quaternaire du Bassin de la Campine.	
3.12	3.30
Localisation des piézomètres.	
3.13	3.31
Evolution des niveaux de quelques piézomètres représentatifs de (a) l'aquifère du Néogène, (b) l'aquifère du Sous-Rupélien et (c) l'aquifère du Lédo-Bruxellien.	
3.14	3.36
Délimitation géographique et géologique des trois modèles hydrogéologiques.	
3.15	3.38
Piézométrie des aquifères du Néogène calculée avec la version de référence du modèle régional.	
3.16	3.39
Piézométrie des aquifères du Sous-Rupélien et du Lédo-Bruxellien calculée avec la version de référence du modèle régional.	

A.2

3.17	Impact d'une réduction de l'infiltration par un facteur 3 sur la piézométrie du Néogène et du Sous-Rupélien.	3.42
3.18	Impact d'une érosion fluviale provoquée par un abaissement du niveau de la mer sur la piézométrie du Néogène et du Sous-Rupélien.	3.43
3.19	Piézométrie obtenue avec le modèle sub-régional.	3.46
3.20	Détermination, grâce au modèle local, des trajectoires des particules d'eau qui quittent le site de référence par le haut.	3.47
3.21	Le suremballage utilisé pour les démonstrations dans le hall PRACLAY.	3.51
3.22	L'architecture de référence de dépôt en profondeur pour les déchets vitrifiés.	3.52
3.23	Coupe transversale d'une galerie de dépôt pour déchets vitrifiés montrant le principe des barrières multiples.	3.53
3.24	L'architecture de référence de dépôt en profondeur pour les combustibles usés.	3.55
3.25	Le laboratoire souterrain de recherche HADES.	3.60
3.26	Vue générale du laboratoire souterrain de recherche HADES.	3.60
3.27	Les trois types de revêtement utilisés jusqu'à présent dans l'installation souterraine.	3.61
3.28	Creusement du deuxième puits.	3.63
3.29	Creusement du deuxième puits. Plan de glissement et fissures observés lors du creusement des amorces.	3.64
3.30	Le dispositif de manutention des suremballages de déchets vitrifiés.	3.68
3.31	La maquette ophélie.	3.72
3.32	Principales étapes de la dissolution des déchets vitrifiés.	3.76
3.33	Représentation des mécanismes de dissolution de la matrice UO ₂ .	3.81
3.34	Comparaison entre résultats expérimentaux et courbes théoriques pour le test de migration in situ avec de l'eau tritiée.	3.92
3.35	Profil de l'activité du ¹³⁴ Cs dans la carotte d'argile pour le test de percolation in situ.	3.92
3.36	Les différentes interactions possibles entre les radionucléides et la matière organique.	3.96
3.37	Répartition des radionucléides suivant leurs concentrations dans les solutions de percolation en fonction du temps.	3.97
3.38	Profils d'éluion obtenus avec de la matière organique de différents poids moléculaires marquée au ¹⁴ C.	3.100
3.39	Variabilité des paramètres de migration pour les espèces HTO et I ⁻ et de la conductivité hydraulique sur l'épaisseur de l'Argile de Boom pour le forage Mol-1.	3.102
3.40	Schéma de l'expérience in situ CERBERUS.	3.107
3.41	Champ thermique généré par un dépôt de déchets vitrifiés.	3.110
3.42	Modèle de la biosphère.	3.123
3.43	Epaisseur et profondeur du sommet de la Formation de Courtrai.	3.127
4.1	Le processus itératif des évaluations de sûreté à long terme, qui s'inscrivent dans le processus progressif et flexible de réalisation du système de dépôt final.	4.5
4.2	Événements extérieurs probables susceptibles d'affecter l'évolution dans le temps du système de dépôt et de son environnement, robustesse des principaux composants du système et de son environnement et évolution du type de calculs effectués dans les évaluations de sûreté.	4.12
4.3	Principaux composants du système de dépôt et de son environnement et principaux processus considérés dans la description du scénario d'évolution normale.	4.14

4.4	Représentation schématique du scénario d'évolution normale (captage d'eau) et du scénario de forage d'exploitation.	4.15
4.5	Poids relatifs des deux groupes d'indicateurs de sûreté et des arguments qualitatifs.	4.18
4.6	Configuration et simplifications considérées pour les calculs de transport dans le champ proche et la couche argileuse.	4.22
4.7	Flux d' ^{129}I à l'interface entre l'Argile de Boom et l'aquifère du Néogène dû aux déchets vitrifiés.	4.25
4.8	Flux d'activité à l'interface entre l'Argile de Boom et l'aquifère du Néogène dû aux déchets vitrifiés, aux combustibles usés et aux coques et embouts.	4.26
4.9	Flux d'activité à l'interface entre l'Argile de Boom et l'aquifère du Néogène des produits d'activation et de fission contenus dans les déchets vitrifiés.	4.27
4.10	Flux d'activité à l'interface entre l'Argile de Boom et l'aquifère du Néogène des actinides de la chaîne $^{237}\text{Np} \rightarrow ^{233}\text{U} \rightarrow ^{229}\text{Th}$ contenus dans les déchets vitrifiés.	4.27
4.11	Flux d'activité à l'interface entre l'Argile de Boom et l'aquifère du Néogène des produits d'activation et de fission contenus dans les combustibles usés (1980 tUOX-55), calculé avec le modèle d'auto-oxydation alpha.	4.28
4.12	Flux d'activité à l'interface entre l'Argile de Boom et l'aquifère du Néogène des actinides de la chaîne $^{237}\text{Np} \rightarrow ^{233}\text{U} \rightarrow ^{229}\text{Th}$ contenus dans les combustibles usés (1980 tUOX-55), calculé avec le modèle d'auto-oxydation alpha.	4.29
4.13	Flux d'activité à l'interface entre l'Argile de Boom et l'aquifère du Néogène des produits d'activation et de fission contenus dans les coques et embouts.	4.30
4.14	Flux d'activité à l'interface entre l'Argile de Boom et l'aquifère du Néogène des actinides de la chaîne $^{237}\text{Np} \rightarrow ^{233}\text{U} \rightarrow ^{229}\text{Th}$ contenus dans les coques et embouts.	4.30
4.15	Débit de dose total par un puits de captage dû aux produits de fission et d'activation contenus dans les déchets vitrifiés.	4.33
4.16	Débit de dose total par un puits de captage dû aux actinides contenus dans les déchets vitrifiés.	4.33
4.17	Débit de dose total par un puits de captage dû aux produits d'activation et de fission contenus dans 1980 tUOX-55.	4.34
4.18	Débit de dose total par un puits de captage dû aux actinides contenus dans 1980 tUOX-55.	4.34
4.19	Débit de dose total par un puits de captage dû aux produits de fission et d'activation ainsi qu'aux actinides contenus dans l'ensemble des combustibles usés.	4.35
4.20	Débit de dose total par un puits de captage dû aux produits d'activation et de fission contenus dans les coques et embouts.	4.35
4.21	Activité cumulée qui atteint l'aquifère du Néogène due aux déchets vitrifiés.	4.36
4.22	Evolution des débits de dose totaux pour les deux scénarios de retraitement dans le cas du scénario d'évolution normale.	4.42
4.23	Quantités cumulées de ^{126}Sn relâchées par les différentes barrières du système de dépôt et par son environnement suite au dépôt de 1980 tUOX-55.	4.44
4.24	Quantités cumulées d' ^{129}I relâchées par les différentes barrières du système de dépôt et par son environnement suite au dépôt de 1980 tUOX-55.	4.44

A.4

6.1	Les différentes épaisseurs de la couche d'Argile de Boom à l'aplomb de la zone nucléaire de Mol-Dessel.	6.5
6.2	Schéma de principe des différentes étapes du programme en matière de dépôt en profondeur au sein de l'Argile de Boom tel que proposé par l'ONDRAF.	6.23

Tables

3.1	Les caractéristiques des trois catégories de déchets radioactifs selon la classification internationale.	3.4
3.2	Inventaire des déchets radioactifs destinés au dépôt en profondeur.	3.7
3.3	Inventaire des radionucléides considérés dans les évaluations de sûreté à long terme pour les déchets les plus contraignants en termes radiologiques et thermiques.	3.10
3.4	Principales caractéristiques minéralogiques de l'Argile de Boom.	3.23
3.5	Meilleure estimation et intervalle de confiance pour les perméabilités horizontale et verticale de l'Argile de Boom.	3.33
3.6	Aperçu des évolutions hydrogéologiques possibles considérées.	3.41
3.7	Principales caractéristiques de l'architecture de dépôt final envisagée pour les déchets vitrifiés, fonctions assurées par les principaux composants du système et de son environnement et fonctions considérées dans les évaluations de la sûreté radiologique à long terme pour le scénario d'évolution normale.	3.56
3.8	Caractéristiques de l'eau interstitielle de l'Argile de Boom.	3.93
3.9	Interactions solide-solution pouvant contribuer à la rétention des radionucléides dans l'Argile de Boom.	3.95
3.10	Facteurs et/ou processus déterminant le comportement des radionucléides dans l'Argile de Boom.	3.98
3.11	Caractéristiques géomécaniques non drainées de l'Argile de Boom.	3.112
4.1	Aperçu des évaluations de sûreté relatives au dépôt en profondeur effectuées avant 1996 dans le cadre du programme belge.	4.3
4.2	Classification des FEPs.	4.9
4.3	Classification de FEPs en fonction de l'état du système de dépôt et de son environnement.	4.10
4.4	Principales caractéristiques des termes sources utilisées dans les calculs de transport dans le champ proche et l'Argile de Boom.	4.24
5.1	Evaluations du coût d'un dépôt final pour les déchets vitrifiés et les combustibles usés.	5.2
6.1	Les fonctions de sûreté à long terme assurées par les principaux constituants du système de dépôt.	6.9

Encadrés

Déchets des catégories B et C	1.1
Mise en dépôt final	1.3
Installation de dépôt final	1.3
Système de dépôt final	1.3
Architecture de dépôt	1.4
Principaux objectifs de la deuxième phase du programme de recherche et développement méthodologique de l'ONDRAF, qui tiennent compte des recommandations les plus importantes de la Commission d'évaluation SAFIR (1990)	1.6
Evaluation de sûreté	2.2
Dose absorbée	2.5
Dose équivalente	2.5
Dose efficace	2.5
Limite de dose	2.6
Contrainte de dose	2.6
Les trois principes fondamentaux de la radioprotection	2.6
Barrière	2.8
Environnement du système de dépôt	2.8
Biosphère	2.8
Champ proche	2.9
Champ lointain ou géosphère	2.9
Fonction de sûreté	2.11
Réserve de sûreté	2.12
Robustesse	2.13
Récupérabilité	2.15
Granulométrie	3.17
Septaria	3.18
Magnitude	3.25
Intensité	3.25
Aquifère et aquitard	3.27
Drainance	3.29
Safeguards	3.58
Compatibilité	3.75
Espèces, spéciation, sorption, solubilité	3.89
Facteur de retard, porosité accessible à la diffusion	3.90
Groupe de référence	3.122
Caractéristiques majeures et principales questions ouvertes concernant l'Argile de Boom en tant que formation-hôte à l'aplomb de la zone nucléaire de Mol-Dessel.	3.31

A.2 Sigles, acronymes et noms propres

AEN	Agence pour l'énergie nucléaire de l'Organisation de coopération et de développement économiques (Paris, France)
AFCN	Agence fédérale de contrôle nucléaire (Bruxelles, Belgique)
AIEA	Agence internationale de l'énergie atomique (Vienne, Autriche)
ALARA	As low as reasonably achievable (Le principe ALARA, le deuxième des trois principes fondamentaux de la radioprotection, vise à faire en sorte que toute dose consécutive à une exposition aux rayonnements ionisants soit aussi faible que raisonnablement possible, compte tenu des facteurs économiques et sociaux.)
ANDRA	Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Châtenay-Malabry, France)
Belgoproprocess	Entreprise filiale de l'ONDRAF, chargée de la majeure partie des opérations de gestion à court terme des déchets radioactifs (Dessel, Belgique)
CEN•SCK	Centre d'étude de l'énergie nucléaire (Mol, Belgique)
CIPR	Commission internationale de protection radiologique
COGEMA	Compagnie générale des matières nucléaires (société française qui exploite à La Hague une usine de retraitement des combustibles usés)
EDZ	Excavation disturbed zone (zone perturbée par l'excavation)
EPRI	Electric Power Research Institute (Palo Alto, Californie, Etats-Unis)
EURIDICE	European underground research infrastructure for disposal of nuclear waste in a clay environment
EUROCHEMIC	Société européenne pour le traitement chimique des combustibles irradiés (actuellement Belgoproprocess)
EVEREST	Evaluation of Elements Responsible for the Effective Engaged Dose Rates Associated with the Final Storage of Radioactive Waste
FEP	Features, events, and processes
GIE EURIDICE	Groupement d'intérêt économique EURIDICE (Mol, Belgique)
HADES	High-activity disposal experimental site (laboratoire souterrain du CEN•SCK construit dans l'Argile de Boom)
MOX	Mixed-oxide fuel (combustible nucléaire constitué d'un mélange d'oxyde d'uranium et d'oxyde de plutonium)
OCDE	Organisation de coopération et de développement économiques (Paris, France)
ONDRAF	Organisme national des déchets radioactifs et des matières fissiles enrichies (Bruxelles, Belgique)
OPHELIE	On surface preliminary heating simulation experimenting later instruments and equipment (maquette instrumentée de la galerie PRACLAY réalisée en surface)

PACOMA	Performance assessment of geological disposal of medium-level and alpha waste in a clay formation in Belgium
PAGIS	Performance assessment of geological isolation systems (programme de l'Union européenne consacré à l'évaluation de la sûreté d'installations souterraines de mise en dépôt final)
PAMELA	Pilotanlage Mol zur erzeugung lagerfähiger abfälle (installation-pilote de conditionnement, située à Belgoprocess)
PRACLAY	Preliminary demonstration test for clay disposal (expérience de démonstration in situ en vraie grandeur)
SAFIR	Safety assessment and feasibility interim report
SPA	Spent fuel performance assessment
Synatom	Société belge des combustibles nucléaires (filiale d'Electrabel et de Tractebel chargée d'approvisionner les centrales nucléaires belges en uranium enrichi et de gérer les combustibles nucléaires usés déchargés des réacteurs jusqu'à la prise en charge définitive des déchets conditionnés de retraitement, voire des combustibles usés eux-mêmes, par l'ONDRAF) (Bruxelles, Belgique)

A.3 Lectures complémentaires

1. International Commission on Radiological Protection, 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Publication 60, 1990.
2. Nuclear Energy Agency, Disposal of Radioactive Waste : Can Long-Term Safety Be Evaluated ? An International Collective Opinion of the NEA, IAEA and CEC, 1991.
3. International Commission on Radiological Protection, Protection from Potential Exposure: A Conceptual Framework. Publication 64, Volume 23, No. 1, 1993.
4. International Atomic Energy Agency, Safety Indicators in Different Time Frames for the Safety Assessment of Underground Radioactive Waste Repositories, First report of the INWAC Subgroup on Principles and Criteria for Radioactive Waste Disposal, 1994.
5. International Atomic Energy Agency, Siting of Geological Disposal Facilities, Safety Series N° 111-G-4.1, 1994.
6. De Putter Th. et Charlet J.-M., Analogies naturelles en milieu argileux, Essai de synthèse bibliographique, NIROND 94-13, 1994.
7. Wouters L. et Vandenberghe N., Géologie de la Campine, Essai de synthèse, NIROND 94-12, 1994.
8. Nuclear Energy Agency, The Environmental and Ethical Basis of Geological Disposal. A Collective Opinion of the NEA Radioactive Waste Management Committee, 1995.
9. International Atomic Energy Agency, The Principles of Radioactive Waste Management, Safety Series No. 111-F, 1995.
10. Savage D. (Ed.), The Scientific and Regulatory Basis for the Geological Disposal of Radioactive Waste, Wiley, 1995.
11. Baekelandt L. et al, Building the Safety Case for a Hypothetical Underground Repository in Clay, Final Report, DS/95/20 (Volume 2), 1996.
12. Vanmarcke H., Baugnet-Mahieu L., Culot J.P., Govaerts P., Holmstock L., Rayonnements ionisants – Effets de faibles doses, NIROND 96-03, 1996.
13. International Atomic Energy Agency, Collection sécurité, Principes de gestion des déchets radioactifs, Collection sécurité N° 111-F, 1996.
14. International Atomic Energy Agency, International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources, Safety Series N° 115, 1996.
15. European Commission, First Performance Assessment of the Disposal of Spent Fuel in a Clay Layer. EUR 16752 EN, 1996.
16. Nuclear Energy Agency, Water, Gas and Solute Movement through Argillaceous Media, Report CC-96/1, 1996.
17. European Commission, Evaluation of Elements Responsible for the Effective Engaged Dose Rates Associated with the Final Storage of Radioactive Waste : Everest project, EUR 17122EN, 1996.
18. Eisenbud M., Gesell Th., Environmental Radioactivity - from Natural, Industrial and Military Sources, Academic Press, 1997.
19. Nuclear Energy Agency, Lessons Learnt from Ten Performance Assessment Studies, 1997.

20. Nuclear Energy Agency, Consejo de Seguridad Nuclear, Empresa Nacional de Residuos, Regulating the Long-Term Safety of Radioactive Waste Disposal, Proceedings of a Workshop, Cordoba, Spain, 20-23 January 1997, 1997.
21. Nuclear Energy Agency, Fluid Flow through Faults and Fractures in Argillaceous Formations, Proceedings of a Joint NEA/EC Workshop, Berne, Switzerland, 10-12 June, 1996, 1998.
22. Nuclear Energy Agency, Confidence in the Long-term Safety of Deep Geological Repositories. Its development and Communication. 1999.
23. UK House of Lords Select Committee on Science and Technology, Management of Nuclear Waste, HL Paper 41, March 1999.
24. Posiva Oy, The Final Disposal Facility for Spent Nuclear Fuel, Environmental Impact Assessment Report, 1999.
25. SKB, Deep Repository for Spent Nuclear Fuel, SR97 – Post-Closure Safety, Main Report Summary, TR-99-06, 1999.
26. Nuclear Energy Agency, Progress Towards Geologic Disposal of Radioactive Waste: Where Do We Stand? An International Assessment, 1999.
27. Japan Nuclear Cycle Development Institute, H12 : Project to Establish the Scientific and Technical Basis for HLW Disposal in Japan, Second Progress Report on Research and Development for the Geological Disposal of HLW in Japan, 2000.
28. Nuclear Energy Agency, Porewater Extraction from Argillaceous Rocks for Geochemical Characterisation, Methods and Interpretations, 2000.
29. International Atomic Energy Agency, Safety of Radioactive Waste Management, Proceedings of an International Conference, Cordoba, Spain, 13-17 March 2000, 2000.
30. Nuclear Energy Agency, Radiological Impacts of Spent Nuclear Fuel Management Options. A Comparative study, 2000.
31. European Commission, Spent Fuel disposal Performance Assessment (SPA project), EUR 19132 EN, 2000.
32. Nuclear Energy Agency, Regulatory Reviews of Assessments of Deep Geologic Repositories, Lessons learnt, 2000.
33. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly. Sources and Effects of Ionizing Radiation. Volume I: Sources. Volume II: Effects, 2000.
34. Miller, W., et al., Geological Disposal of Radioactive Wastes and Natural Analogues – Lessons from Nature and Archaeology, Pergamon, 2000
35. National Academy of Sciences - National Research Council. Disposition of High-Level Waste and Spent Nuclear Fuel. The Continuing Societal and Technical Challenges. National Academy Press, 2001.

A.5 Avis final du comité de lecture du rapport SAFIR 2

[à introduire]

ONDRAF

**Organisme national des déchets radioactifs
et des matières fissiles enrichies**

Avenue des Arts 14

1210 Bruxelles

tél. +32 2 212 10 11

fax +32 2 218 51 65

info@nirond.be