

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 HADES-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.

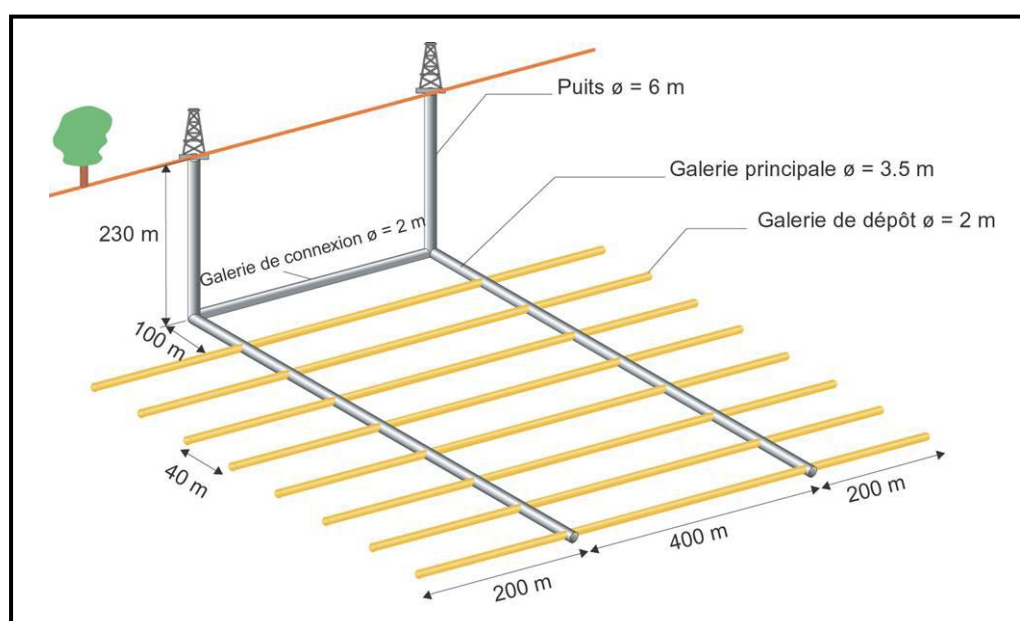


Figure 3.22 L'architecture de référence de dépôt en profondeur pour les déchets vitrifiés.

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.

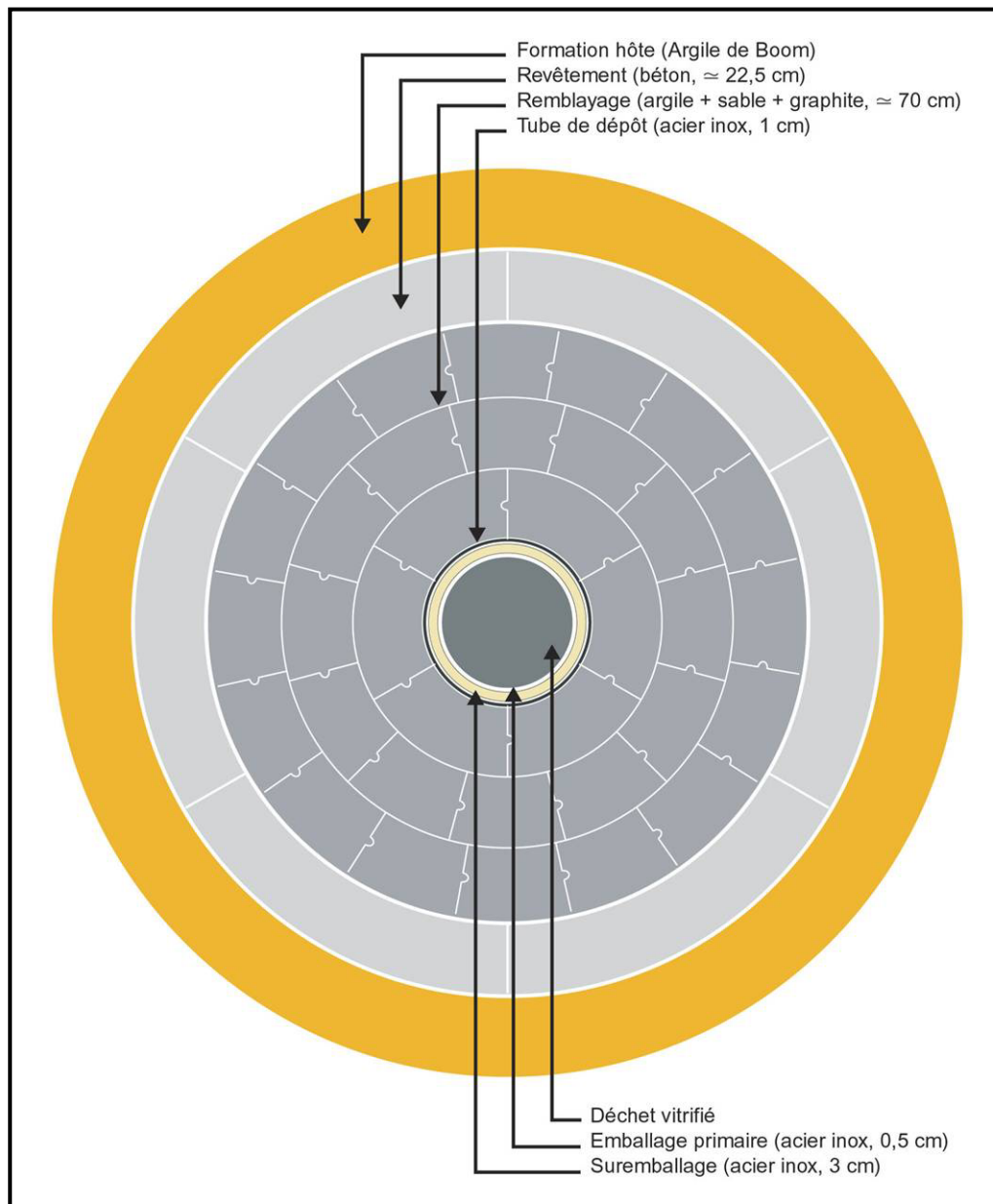


Figure 3.23 Coupe transversale d'une galerie de dépôt pour déchets vitrifiés montrant le principe des barrières multiples.

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.

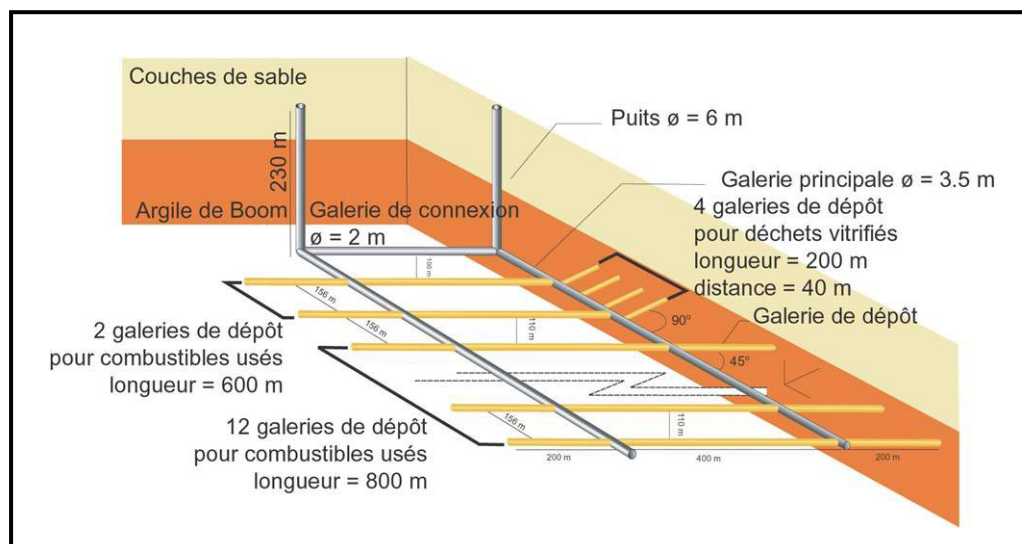


Figure 3.24 L'architecture de référence de dépôt en profondeur pour les combustibles usés.

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 moins 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.

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,

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

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 × 4 roulettes à 90°)	Acier inox AISI 316L hMo hauteur : 1.58 m Ø interne : 46 cm épaisseur : 30 mm poids moyen rempli : 1 000 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	Evacuation 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 × 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 Etanchéité	–	–	–	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	Mélange d'argile gonflante FoCa et de sable Béton	Protection radiologique Résistance mécanique	C2	R2	R2	–

principaux composants du système et de son environnement et, **en gras**, fonctions considérées dans les évaluations de la sûreté rétentive. 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 10 000 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).

le public et l'environnement afin de s'assurer du respect des normes en vigueur et, le cas échéant, 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 justifèrent le recours à un revêtement très résistant : des voussoirs en fonte nodulaire galvanisée, extrêmement rigides (fig. 3.27).

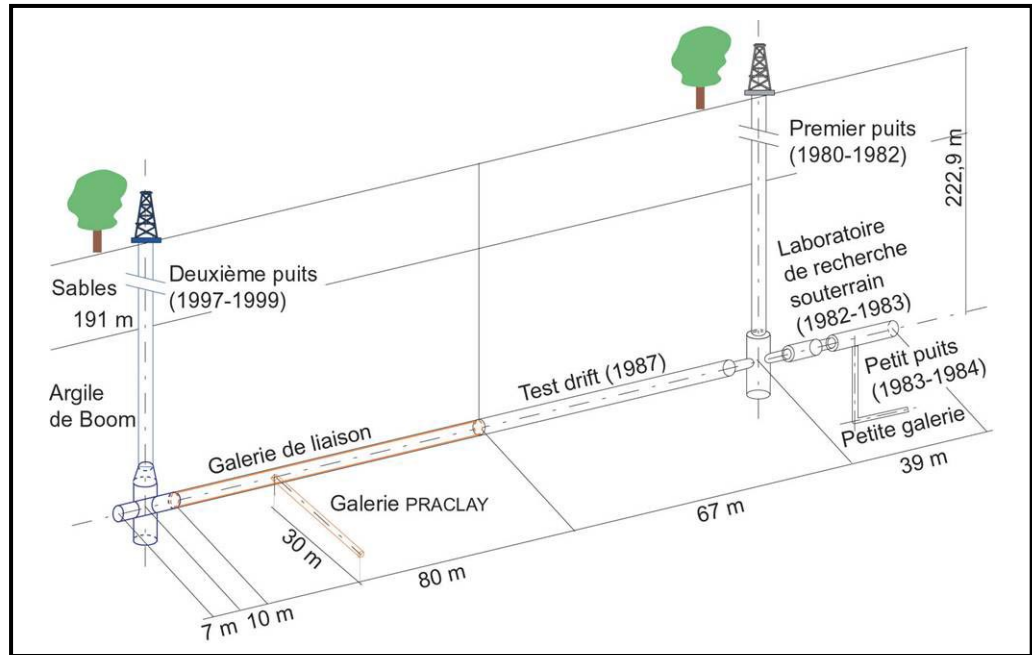


Figure 3.25 Le laboratoire souterrain de recherche HADES. Le creusement de la galerie de liaison et de la galerie PRACLAY (en brun) est prévu pour 2002 et 2006 respectivement.

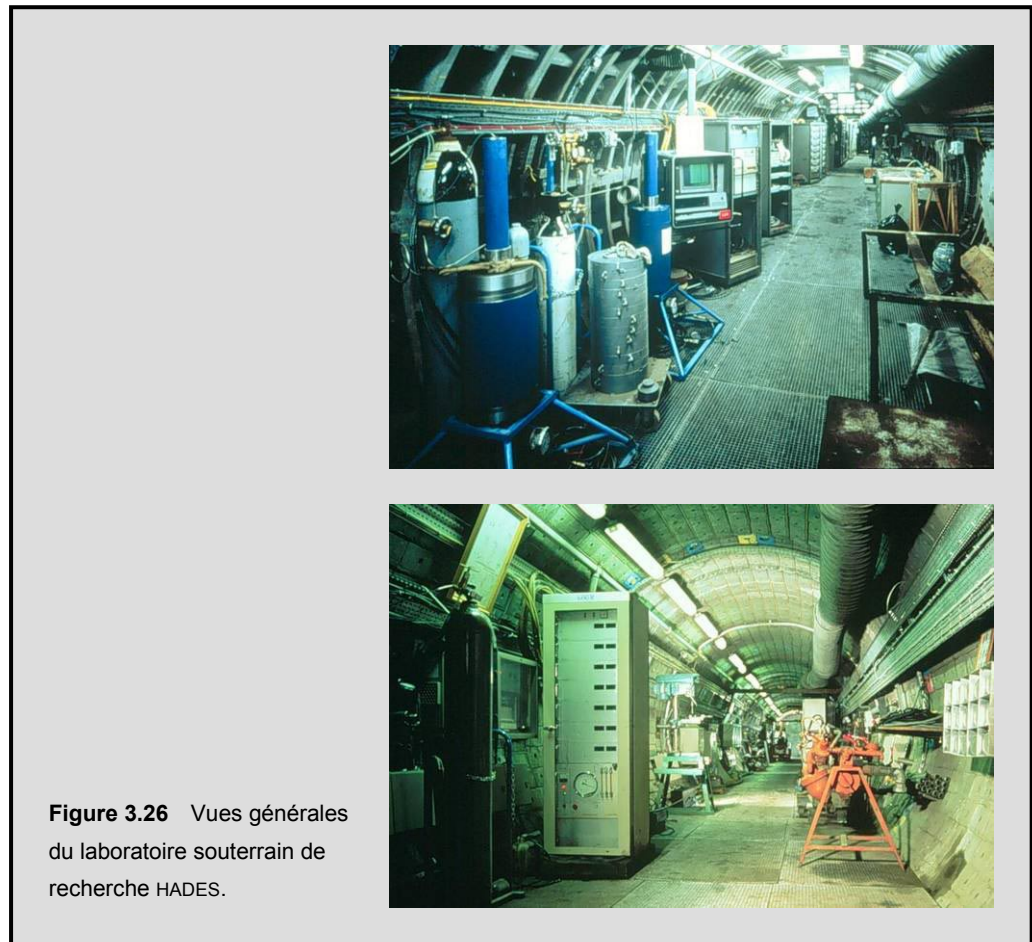


Figure 3.26 Vues générales du laboratoire souterrain de recherche HADES.



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

La technique de la congélation et l'utilisation de voussoirs en fonte nodulaire semblent 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. 3.27). 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. 3.27), 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. 3.28) 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. 3.28), 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 apparaissent 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.

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).



Figure 3.28 Creusement du deuxième puits.
Creusement de l'amorce de la galerie de liaison
(en haut) et bras hydraulique et cintres
métalliques coulissants (en bas).



Figure 3.29 Creusement du deuxième puits. Plans de glissement (en haut) et fissures (en bas) observés lors du creusement de l'amorce de la galerie de liaison.

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 $P_h = K_o \cdot P_v$, 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 solidarisiées 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.



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 sauvées 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 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.

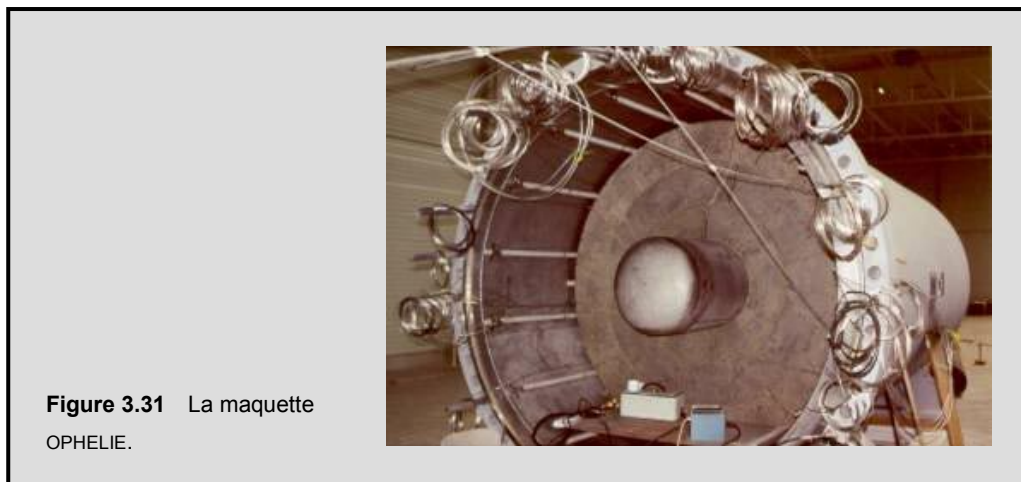
3.3.3 Le projet de démonstration PRACLAY

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 OPHELIE (*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.



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. 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.

3.3 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

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.

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.

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. Cette dissolution s'effectue en trois étapes principales :

- 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.

Ce processus de dissolution est schématisé à la figure 3.32.

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.