

DU COMBUSTIBLE NUCLÉAIRE AUX DÉCHETS :
RECHERCHES ACTUELLES

FROM NUCLEAR FUELS TO WASTE: CURRENT RESEARCH

Entreposage des déchets B : quoi ? quels obstacles ? quelles localisations ?

Michèle Tallec, Jean-Marc Capdevila

CEA, centre de Saclay, Direction de l'énergie nucléaire, bâtiment 125, 91191 Gif sur Yvette cedex, France

Reçu le 3 mai 2002 ; accepté le 4 juin 2002

Note présentée par Édouard Brézin.

Résumé

Les déchets radioactifs de type B, seront produits à hauteur de $100\,000\text{ m}^3$: 10 fois plus que les déchets vitrifiés, avec une activité moindre. Non valorisables, ils relèveront certainement du stockage géologique.

L'attente de la réalisation de cet éventuel stockage, rend nécessaire l'entreposage. Ceci est actuellement réalisé dans des entrepôts « industriels » à durée de vie limitée et la pertinence de réaliser un entreposage de longue durée est examinée. Les grandes lignes guidant l'élaboration des concepts d'ELD-B et des colis entreposables sont présentés en précisant l'importance des recherches sur le comportement à long terme des colis et de la mise en cohérence avec le concept de stockage développé par l'ANDRA. *Pour citer cet article : M. Tallec, J.-M. Capdevila, C. R. Physique 3 (2002) 851–866.*

© 2002 Académie des sciences/Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

gestion des déchets radioactifs / déchets B / déchets MAVL / entreposage de longue durée / stockage / colis / conteneur

Storage of ILLW: what problems ? where ?

Abstract

Intermediate Level Long Life Waste will be produced in quantities up to $100\,000\text{ m}^3$: 10 times more than vitrified waste but corresponding to a minor activity. They are worthless and hence will certainly be sent to a geological repository.

Before that, they must be put in interim storage which has, at present, about a fifty year lifespan. Therefore, it should be interesting to develop long life interim storage concepts connected either to studies on the long term behaviour of the packages, or to the evolving geological repository concept: development processes and first results are exposed here. *To cite this article: M. Tallec, J.-M. Capdevila, C. R. Physique 3 (2002) 851–866.*

© 2002 Académie des sciences/Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

nuclear waste management / ILLW waste / interim storage / geological repository / packages / container

1. Introduction

De notre capacité à proposer des solutions satisfaisantes pour résoudre la problématique de la gestion des déchets radioactifs dépendra directement, par le biais de son acceptation par la société, l'avenir de l'énergie nucléaire en France.

Adresses e-mail : michele.tallec@cea.fr (M. Tallec); jean-marc.capdevila@cea.fr (J.-M. Capdevila).

Par l'intermédiaire de la « loi du 30 décembre 1991 », le législateur a fixé un rendez-vous aux chercheurs en 2006 pour examiner l'éventail des solutions qui seront proposées et qui devront être acceptables du point de vue de la réduction de l'impact sur l'environnement, de la minimisation des charges aux générations futures et de la facilité de mise en œuvre industrielle.

Bien que l'attention se cristallise généralement autour du débat sur le mode de gestion du combustible utilisé (doit-on continuer à retraiter le combustible sortant des réacteurs ?) ou à un degré moindre sur les déchets faiblement radioactifs, pour lesquels deux centres de stockage définitif en surface ont successivement été ouverts sur le territoire français, il est tout aussi nécessaire de se pencher sur le sort des déchets B (ou moyenne activité à vie longue) de radio-toxicité intermédiaire et pour lesquels l'entreposage joue et jouera un rôle déterminant.

2. Les déchets B

2.1. L'inventaire

L'AIEA définit le déchet radioactif de la manière suivante : « Toute matière contenant des radionucléides en concentration supérieure aux valeurs que les autorités compétentes considèrent comme admissibles dans les matériaux propres à une utilisation sans contrôle et pour laquelle aucun usage n'est prévu ».

La majeure partie de ces déchets est produite par le cycle du combustible inhérent à l'exploitation des centrales nucléaires. D'autres sources produisent aussi des déchets mais en quantités moindres : les laboratoires de recherches (dont le CEA), les hôpitaux, les universités et l'industrie non nucléaire.

En France, trois catégories de déchets sont distinguées en fonction de leur niveau d'activité et de la nature des radionucléides qu'ils contiennent (A, B ou C, auxquelles il faut rajouter les TFA) et pour chacune de ces familles un mode de gestion est identifié ou en cours d'élaboration (cf. Tableau 1). Les déchets B sont les déchets de moyenne activité à vie longue. Ils contiennent essentiellement des émetteurs α , mais en faibles quantités, et sont de ce fait peu ou pas thermiques.

Fin 1998, on répertoriait les volumes de déchets B « anciens » suivants : 24 000 m³ de déchets conditionnés et de 15 à 20 000 m³ de déchets en attente (cf. Fig. 1). Les déchets conditionnés comportaient 2 familles essentielles, à savoir les déchets bitumés, cimentés ; une troisième famille essentielle va être produite dès 2002 et pendant toutes les années à venir : les « colis standard de déchets compactés » (CSD-C). La typologie des déchets en attente est plus étendue : déchets technologiques, déchets activés, coques et embouts (ils seront conditionnés en CSD-C), déchets magnésiens, pulvérulents et boues de retraitement.

Pour les années à venir, en s'appuyant sur une hypothèse de durée d'exploitation des réacteurs français de 40 ans, de retraitement de tous les combustibles UOX, le volume de déchets B produit d'ici 2020 serait

Tableau 1. Classification des déchets français

Catégorie	Période courte (<30 ans)	Période longue (>30 ans)
TFA très faible activité	Stockage de déchets TFA	
FA (ou A) faible activité	Stockage en surface	Stockage de déchets radifères
MA (ou B) moyenne activité		
HA (ou C) haute activité	Recherches – Loi de 91	

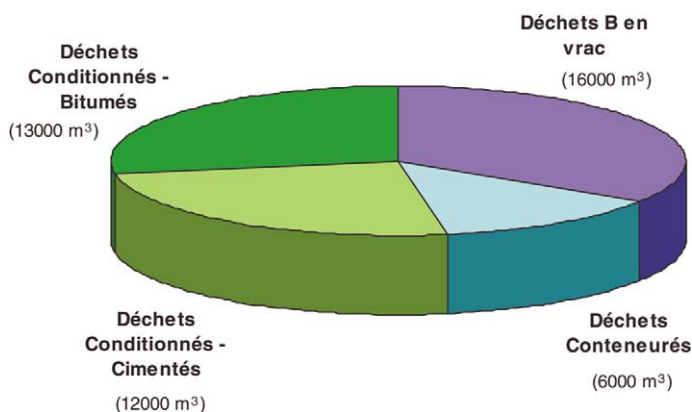


Figure 1. Typologie des déchets B existants.

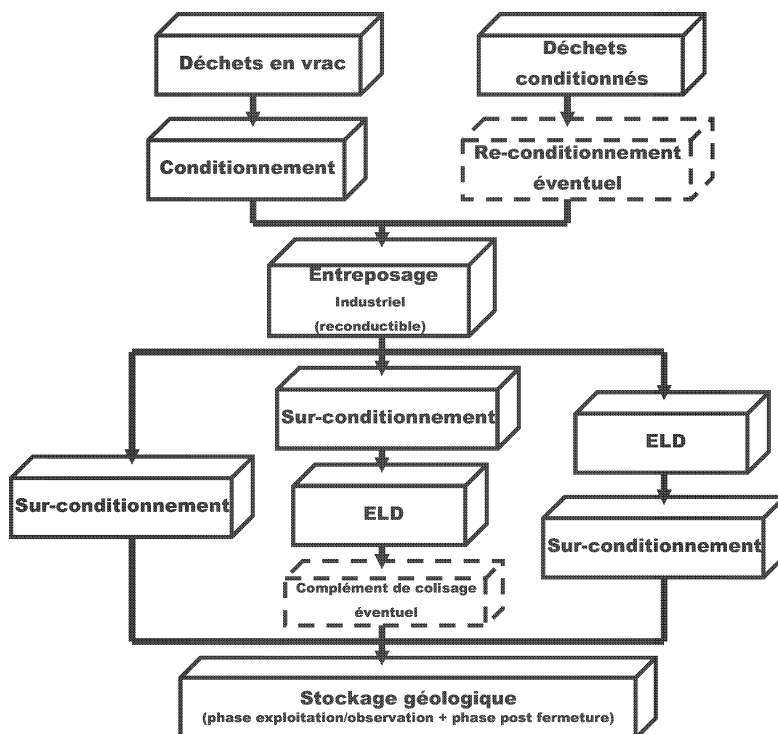


Figure 2. Scénario de gestion des déchets B.

de l'ordre de 47 000 m³. Ce à quoi il faut également ajouter les déchets B issus des futures opération de démantèlement, sous environ 4000 m³.

À l'orée 2020 le volume de déchets B à gérer sera donc de l'ordre de 100 000 m³, volume environ 10 fois plus important que celui des déchets vitrifiés mais contenant une activité associée considérablement plus faible (seulement 1% de l'activité totale de tous les déchets).

2.2. Gestion des déchets B

Les déchets B ne contiennent, contrairement aux déchets C (combustibles usés ou solutions de produits de fission vitrifiées), qu'une faible proportion d'actinides, il ne contiennent donc que peu ou pas de matière valorisable. De plus, compte tenu de leur « faible activité relative » et de la grande variété des

conditionnements dans laquelle ils se trouvent aujourd'hui, il est illusoire de penser les rendre moins toxiques par un processus de séparation et transmutation, qui devrait dans tous les cas être précédé d'étapes lourdes de dissolution chimique qui génèreraient des volumes d'effluents liquides considérables.

En conséquence de quoi, le stockage se présente certainement comme l'exutoire logique des scénarios de gestion des déchets B. Mais dans l'attente de la décision qui sera prise à l'issue des recherches engagées dans le cadre de la loi du 30 décembre 91, puis de la disponibilité d'une installation participant à leur mode de gestion final, ces déchets, dont une grande quantité a déjà été produite, sont et devront nécessairement être entreposés (cf. Fig. 2). Ceci est aujourd'hui réalisé en général à proximité des sites de production dans des entrepôts dits « industriel » dans la durée de vie, non précisément évaluée aujourd'hui semble être d'au moins quelques dizaines d'années : ces entreposages ne peuvent être en aucun cas considérés comme définitifs.

Des études sont cours pour proposer un concept d'entreposage longue durée pour colis B (ELD-B) qui constituerait aussi une phase transitoire avant le stockage mais qui, du fait de la longueur prévue de sa durée de vie, quelques centaines d'années, permettrait d'assurer une gestion plus rationnelle en limitant les interventions nécessaires sur chaque colis, diminuant ainsi d'une certaine manière les charges aux générations futures (la minimisation absolue restant néanmoins de réaliser le stockage).

3. Traitement/conditionnement et conteneurage des déchets B

Préalablement à une étude plus détaillée des modes d'entreposage en cours ou envisagés, intéressons nous aux phases de traitement et de conditionnement de ces déchets B.

L'objectif des opérations de conditionnement est d'assurer à tous déchets B existants ou à produire un confinement sûr, stable, monolithique et durable, sous la forme d'objets manutentionnables et transportables, les colis, dont on doit garantir la possibilité de reprise à terme dans d'éventuelles installations d'entreposage, d'ELD ou même en phase d'exploitation du stockage (avant fermeture).

L'image technologique d'un colis de déchets B pour l'entreposage est aujourd'hui la suivante : chaque « colis final entreposable » est constitué d'un ou plusieurs « colis primaires » qui pourront si nécessaire être disposé(s) dans un « conteneur externe » dont le rôle dans ce cas là sera aussi de contribuer, autant que faire se peut, à la compatibilité entre l'entreposage et le stockage. Certains colis primaires existants, s'ils sont jugés aptes à conserver de manière durable durant l'entreposage les facultés de confinement et de reprise, pourront ne pas nécessiter l'utilisation d'un conteneurage complémentaire pour l'entreposage.

À l'issu de l'entreposage, le passage à la phase de stockage se fera par prise en charge :

- du « colis final entreposable » directement ou après un reconditionnement léger ;
- des « colis primaires » après reprise.

Avant de détailler plus loin la logique de la phase de conteneurage, étroitement liée au mode de gestion choisi, attardons-nous quelque peu sur le traitement/conditionnement réalisé en amont.

La phase de traitement a pour fonction essentielle de stabiliser le déchet primaire en modifiant sa forme physique tout en essayant de procéder à une réduction de volume du déchet.

La phase de conditionnement qui lui est étroitement liée (ces deux phases sont d'ailleurs quelques fois quasi-simultanées) consiste à réaliser le « colis primaire » c'est-à-dire immobiliser les déchets par enrobage ou blocage dans une matrice adaptée, le tout dans un conteneur primaire. Les qualités recherchées pour le colis primaire ainsi constitué sont le confinement des radionucléides et les propriétés mécaniques.

Les trois types de matrice principalement usitées en France (cf. Fig. 3) sont le ciment, le bitume et le(s) verre(s). Même si contrairement aux deux premières, le verre n'est aujourd'hui utilisé que pour les déchets C, nous le mentionnons car des recherches sont en cours pour adapter ce matériau au conditionnement des déchets B de façon à tirer parti de ses potentialités de forte réduction des volumes, qui seraient intéressantes malgré le surcoût engendré à la production.



(a)



(b)

Figure 3. Principaux types de colis rencontrés : (a) bitumes (cat. B); (b) béton (cat. B); (c) CSD-C (cat. B); (d) CSD-V (cat. C).



(c)



(d)

Ces trois matériaux ont été choisis pour leurs bonnes qualités chimiques (compatibilités avec les déchets, faible solubilité, résistance aux agressions) mais aussi pour leur maturité industrielle ou leur mise en œuvre industrielle aisée.

Le ciment est essentiellement utilisé pour « bloquer » les déchets technologiques solides hétérogènes. C'est un matériau simple, au faible coût de mise en œuvre, utilisé depuis des décennies et donc bien connu, bénéficiant d'une bonne résistance mécanique et qui, par ces qualités de coulage, est bien adapté au blocage de déchets de formes hétérogènes avec un bon remplissage des vides. Les opérations de cimentation ont généralement lieu à proximité des lieux de production de déchets. Le blocage est réalisé dans des conteneurs primaires soit métalliques (fûts pétrolier, CBF-K, ...), soit en béton.

De nombreuses études d'optimisation de la composition du ciment ont été réalisées afin de favoriser la compatibilité chimique avec les déchets et de mieux résister aux conditions environnementales de l'entreposage et/ou du stockage : les bases cimentaires utilisées sont CPA ou CLC auxquelles on adjoint des additifs spécifiques suivant le cas d'application considéré.

Le ciment est également utilisé pour « enrober » des déchets homogènes, par exemple des boues radioactives, de façon à réaliser un matériau lui aussi homogène qui permet d'envelopper chaque particule

du déchet initial dans la matrice. Dans ce cas là, et contrairement au blocage, les propriétés de confinement du ciment vont être exploitées.

Le bitume constitue également un matériau de choix pour l'enrobage des déchets homogènes tels que les boues de retraitement. Ses excellentes caractéristiques physico-chimiques (grande adhésivité, inertie chimique, faible solubilité, tenue à l'irradiation) conjuguées à son faible coût de réalisation ont permis la production en France de plusieurs dizaines de milliers de fûts bitume (fûts pétroliers de 200 litres). Le seul point faible de cette technologie est néanmoins sa propension à émettre des gaz de radiolyse en quantité d'autant plus considérable que l'activité incorporée est importante.

Aujourd'hui, le procédé de référence de traitement/conditionnement des solutions hautement radioactives de retraitement est la vitrification. Elle consiste à incorporer, après évaporation et calcination des solutions, les radionucléides dans un verre borosilicaté ou alumino-borosilicaté. À la sortie du four où il est produit par mélange du calcinât et de la fritte de verre, ce verre est coulé dans conteneur métallique donnant ainsi naissance au « colis standard de déchets vitrifiés » (CSD-V). Le verre produit a des qualités de confinement et de comportement à long terme sans égal aujourd'hui.

Il n'y a pas actuellement de production de verre de type B, autrement dit le procédé de vitrification ne concerne aujourd'hui que les déchets C. Mais la possibilité offerte par ce traitement, de réduire de manière importante (d'au moins un facteur 2) le volume de certains types de déchets B tels que les boues bitumées est intellectuellement et financièrement extrêmement séduisante. Il s'agirait dans le cas présent de réaliser simultanément et dans un même creuset l'incinération et la vitrification des déchets et de produire des verres, eux aussi coulés dans des conteneurs métalliques, qui, sans être aussi optimisés que le verre R7T7, présenteraient des qualités de confinement aussi bonnes que le bitume par exemple tout en éliminant toute production de gaz de radiolyse. Ce procédé devrait permettre de plus, moyennant un choix de la formulation vitreuse adaptée, le traitement de déchets B de types variés aujourd'hui sans exutoire et de rationaliser les modes de conditionnement.

Il ne faut néanmoins pas penser que tous les colis primaires de déchets B existants ou à produire comportent tous des déchets enrobés ou bloqués dans une matrice. Les CSD-C, par exemple, sont constitués de galettes compactées de coques et embouts elles-même empilées dans un conteneur métallique de géométrie proche de celui des CSD-V.

Nous voyons donc, qu'en vue de l'entreposage (entreposage industriel ou ELD à venir), une large part des déchets B existants ou en cours de production ont déjà reçu un conditionnement, en accord avec l'autorité de sûreté : les différents modes de conditionnement utilisés sont la cimentation, le compactage ou le bitumage. Ces solutions conviennent également pour les déchets non conditionnés à ce jour ou ceux dont le conditionnement nécessite d'être repris. En complément, le CEA mène avec ses partenaires des études d'optimisation de ces procédés ou de définition de nouveaux procédés notamment le blocage dans des matrices de hautes performances.

4. Comportement à long terme des colis

Outre le confinement durable et performant des radionucléides, le conditionnement des déchets a aussi pour objectif d'assurer la possibilité de reprise des colis après entreposage, après ELD ou durant la phase réversible du stockage.

Une gestion sûre des colis de déchets nécessite donc de pouvoir garantir que durant toutes ces phases de vie et quelles que soient les conditions environnementales nominales rencontrées les fonctions confinement et reprenabilité sont toujours vérifiées : c'est l'objet des études de comportement à long terme (CLT), qui participent à développer et structurer les connaissances des colis vis-à-vis de cette double fonction.

Le CLT de tous les colis précédemment décrits est étudié en vue d'identifier, de hiérarchiser et de modéliser les phénomènes régissant leur évolution au cours du temps et ainsi de définir les temps caractéristiques qui leur sont associés.

Par « long terme » on perçoit bien que la finalité visée est l'élaboration de modèles qui vont au delà de la phase réversible du stockage et qui s'étendent donc sur plusieurs dizaines de milliers d'années de vie du colis. D'ailleurs tout ce travail est réalisé à la demande des producteurs et en liaison étroite avec l'ANDRA. Mais ces études doivent a fortiori permettre de garantir le maintien de l'intégrité des colis pendant toute la durée et jusqu'à la fin de la phase d'entreposage et donc pour des conditions environnementales souvent très différentes de celles du stockage.

Les modèles élaborés lors des études de CLT doivent permettre de prévoir les performances de tous les colis dans toutes ses phases de vie mais doivent aussi par rétroaction aider à la l'optimisation de l'élaboration de matrices de confinement ou de conteneurs durables et venir enrichir les phases de conception des entrepôts, des ELD ou des stockages.

On distingue pour ces études trois phases de vie distinctes du colis, correspondant à des conditions environnementales des déchets différentes :

- Le fonctionnement en *système fermé*, au cours duquel le colis n'échange avec l'extérieur que de la chaleur (quasiment jamais le cas pour les déchets B hormis pour les CSD-C) ou du rayonnement gamma : ce sont les conditions nominales de l'entreposage et de la phase réversible du stockage.
- Le fonctionnement en *système ouvert insaturé (en eau)*, durant lequel il y a échange de matière avec l'extérieur, du fait de la dégradation de la (des) barrière(s) de confinement : ceci correspond à la phase de post-fermeture du stockage et/ou à des conditions dégradées de l'entreposage.
- Le fonctionnement en *système ouvert saturé* au cours duquel le colis n'a plus d'enveloppe et échange librement avec l'extérieur saturé en eau de la matière et de l'énergie : il s'agit de la dernière phase d'un stockage profond.

Des études CLT ont bien sûr été menées et sont toujours en cours sur les principaux colis de déchets B :

- CSD-C.

L'étude des cas du système fermé et du système ouvert insaturé consiste à évaluer la quantité et la nature (radioactif ou non ?) des gaz relâchés au cours du temps (la radiolyse peut effectivement être importante car il est envisagé que certains CSD-C puissent à terme contenir des déchets technologiques hydrogénés et/ou chlorés en quantités non négligeables) ainsi qu'à garantir que la corrosion ne puisse mettre à mal l'intégrité du colis.

Pour ce qui est du système ouvert saturé, l'hypothèse a été faite jusqu'à présent que seul le zircaloy, et depuis peu l'inconel, pouvaient jouer un rôle de matrice confinante.

- Les colis bitumes.

De même que précédemment, la radiolyse joue un rôle déterminant dans la durabilité durant les phases en système fermé et en système ouvert insaturé : le modèle JACOB-2 a été développé pour décrire l'ensemble des mécanismes (de la production à l'évacuation des bulles) concernant les gaz de radiolyse. Les autres phénomènes importants sont le vieillissement du bitume par oxydation, l'absorption d'humidité (nécessité d'atmosphère contrôlée) ou la bio-dégradation. Le comportement sous eau, quant à lui a largement été étudié et des modèles existent pour décrire les propriétés confinantes de la matrice en système saturé.

- Les colis à matrice liant hydraulique (« colis béton »).

Le cas de ces colis est plus complexe à traiter du fait de leur grande variabilité : pièces de natures diverses bloquées, enrobées ou conteneurées dans un liant hydraulique pouvant revêtir diverses natures possibles (ciment, mortier, béton) et contenant éventuellement armatures ou fibres. En milieu insaturé les phénomènes prépondérants identifiés de dégradation sont la radiolyse, la carbonatation atmosphérique ou la corrosion (béton armé) : ils continuent à être étudiés et modélisés. La dégradation sous eau (milieu saturé), par contre, est mieux connue et même si des efforts restent à fournir, un modèle permettant d'évaluer la durabilité du confinement en fonction de la dégradation du matériau est en voie d'être finalisé.

De plus, les études concernant les verres B éventuellement produits par incinération/vitrification pourront largement s'appuyer sur les résultats des recherches de CLT réalisées sur les CSD-V.

Pour conclure sur ce sujet, il apparaît que pour tous les colis existants ou à produire, une analyse phénoménologique de la dégradation dans le temps a été réalisée. Sans que toutes les conclusions définitives n'aient été tirées, quant aux moyens de prédiction des durées de vie ou quant aux solutions qui peuvent être proposées pour atteindre des durées toujours plus longues, il s'avère que même si les études de CLT initialement entreprises pour le stockage ne prennent pas toujours en compte les conditions environnementales qui seront celles de l'entreposage, qui ne sont donc pas encore figées (les concepts continuent à évoluer) mais sur lesquelles il existe encore des moyens d'action (forte allocation de performance sur l'(les) entrepôt(s)), il se dégage que l'utilisation simultanée (si l'option de l'atmosphère parfaitement contrôlée n'est pas retenue), quel que soit le colis primaire, d'un conteneur externe en béton garantirait le maintien des deux fonctions confinement et reprise même sur durée pluriséculaire d'entreposage.

Tout le travail consiste en fait à trouver le meilleur compromis coût-performances du couple colis-entrepôt en élaborant diverses répartition des allocations de performances : dans le cas d'entrepôt à atmosphère parfaitement contrôlée (% d'humidité, température, ventilation forcée ou naturelle) la plupart des « colis primaires » existants pourraient être « acceptés » directement en entreposage.

5. L'entreposage des déchets B

5.1. Vers un ELD-B ?

Les entreposages industriels, exploités depuis de nombreuses années ont accumulé un grand retour d'expérience : ils sont conçus pour assurer leurs fonctions de sûreté sur une durée typique de quelques dizaines d'années, avec des réexamens de sûreté périodiques. Du point de vue purement technique, cette durée de vie, surtout pour les entrepôts récents (tels que EEV-SE pour les colis de type C CSD-V, EIP (fûts bitume) ou ECC (Colis CSD-C)) ou en projet est vraisemblablement plus élevée et peut relever de la longue durée.

Mais l'entreposage industriel n'est pas une fin en soi : les périodes de décroissance radioactive des déchets B sont de plusieurs ordres de grandeur supérieures aux durées de vie de ces entrepôts et il faut donc pousser la réflexion au delà de quelques dizaines voire quelques centaines d'années. Le scénario de gestion de référence est le stockage a priori profond.

Or aujourd'hui les recherches concernant la définition et la réalisation d'une installation de stockage sont en cours et même si dans le meilleur des cas, la décision de réaliser un stockage était prise en 2006, cette installation ne verrait vraisemblablement pas le jour avant plusieurs dizaines d'années. C'est le rôle du CEA d'étudier et de proposer des solutions d'attente qui permettront d'assurer une gestion rationnelle et acceptable du point de vue de la sûreté pendant toute cette phase de pré-ouverture d'un stockage (dont on n'est même pas certain qu'il sera décidé) ou dans l'attente de l'émergence d'un autre exutoire.

Deux solutions sont envisageables pour couvrir cette période d'attente :

- La 1^{ère} va consister à couvrir cette période en ayant recours à une succession d'entrepôts industriels, ce qui pourrait d'ailleurs être réalisé en reconduisant plusieurs fois consécutivement l'exploitation d'un seul et même entrepôt dont la robustesse aurait été constatée ou améliorée au fil des années d'exploitation.
- Dans la 2^{nde}, plus novatrice, les déchets vont être gérés au sein d'un ELD-B, dont la durée d'exploitation envisagée, dès le début, sera de plusieurs siècles et qui devra se caractériser, par rapport à la 1^{ère} solution, par sa robustesse vis-à-vis des changements des conditions d'environnement technique et sociologique.

Dans le cadre de l'élaboration de ces deux solutions potentielles, le CEA et ses partenaires veillent évidemment à ce que l'ensemble du spectre des colis primaires de déchets B existants ou à venir soit pris en compte. Ceci est en partie réalisé en s'appuyant sur le Modèle d'Inventaire Préliminaire (MIP) édité par l'ANDRA. Ils doivent également s'efforcer de proposer les solutions qui prendront le mieux en compte, d'un point de vue technique mais aussi d'un point de vue financier le devenir des colis après l'entreposage,

c'est-à-dire qui intégreront les contraintes de l'éventuel stockage à venir. Ceci ne peut se faire qu'à travers une collaboration journalière des producteurs et du CEA avec l'ANDRA qui est en charge de l'élaboration du concept de stockage profond. Dans cet ordre d'idée, le point essentiel va consister à établir une cohérence entre les colis («colis primaires» ou «colis final entreposable») sortant de l'entreposage et ceux pris en charge à l'entrée du stockage.

Si l'on examine la 1^{ère} solution, elle présente un certain nombre d'avantages :

- Elle prend déjà en compte l'ensemble des déchets B puisque ceux-ci sont déjà présents dans les entreposages industriels existants.
- Ce sont généralement directement les colis primaires qui sont entreposés et par conséquent la compatibilité avec le concept de stockage de l'ANDRA est forte puisque celui-ci s'appuie également sur des familles construites à partir du MIP.
- Le nombre d'opérations réalisées sur les colis peut être plus important qu'en ELD (notamment éventuellement à chaque «fin de vie» des entrepôts industriels s'il y a transfert), mais leur simplicité (peu ou pas de reconditionnement, seulement transfert périodique des colis primaires) ne devrait a priori pas générer de surcoût important ni de difficulté technique.

Pour la 2^{nde} solution, plus novatrice, le concept à développer doit évidemment s'appuyer sur le REX et apporter les améliorations susceptibles de rendre robustes les installations existantes tout en pouvant utiliser un degré de liberté supplémentaire : le «colis final entreposable».

5.2. Quels colis en ELD-B ?

Le choix de la 1^{ère} solution nécessitera de vérifier que les caractéristiques des colis primaires permettront au couple colis-entrepôt de garantir sur une durée pluriséculaire et sans répercussion forte sur la conception de l'entrepôt, le maintien pour le colis des deux fonctions suivantes :

- confinement des RN ;
- reprise des colis.

Cette solution paraît scientifiquement viable puisqu'il va s'agir de faire porter sur un «super» entrepôt industriel des contraintes supplémentaires de façon à entreposer dans un cocon protecteur des colis que pour la plupart on connaît bien et dont on sait qu'ils sont durables si maintenus dans des conditions environnementales favorables contrôlées. En particulier, ce type d'installation nécessitera un traitement de l'air en entrée ainsi qu'une ventilation nucléaire. La conception de ce type d'entrepôts paraît donc plutôt relever d'une étude d'ingénierie que d'études scientifiques approfondies.

Un dernier point intéressant à souligner est la nécessité, dans le cas de l'adoption de cette solution, de maintenir sur le(s) site(s), ne serait-ce que périodiquement mais plus vraisemblablement en permanence, une activité suffisante pour permettre la réalisation technique des opérations prévues : ce qui peut constituer un élément de fragilisation vis-à-vis d'un bouleversement des conditions environnementales technique et/ou sociologique, ou qui au contraire peut être perçu positivement comme un élément de maintien des compétences sur le(s) site(s) et un élément d'ancrage dans la mémoire collective.

Concernant la 2^{nde} solution, à savoir la conception et l'utilisation d'un ELD-B, se pose de manière plus forte car tous les choix sont ouverts la question de l'allocation de performance entre les colis et l'entrepôt.

Si l'on désire enfermer les déchets dans deux barrières successives, plusieurs choix de répartition peuvent être envisagés.

5.2.1. Une barrière sur le colis et une barrière sur l'entrepôt

Cela nous ramène au cas existant des entrepôts industriels, dont il faudrait instruire la robustesse vis-à-vis de la longue durée pour éviter un transfert périodique des colis ou une reconduction (c'est-à-dire une prolongation de la durée d'exploitation) toujours sujette à caution. Ce travail est fait en s'appuyant sur l'expérience des entrepôts industriels existants en expertisant les problèmes susceptibles de dégrader dans le temps les performances de colis et d'aptitude à la reprise des colis. Il va de soit que dans ce scénario là, le surconteneurage éventuel que devrait supporter les colis primaires (comme c'est le cas dans l'EIP)

pour satisfaire aux exigences de l'entreposage devra être suffisamment léger pour que le colis soit ensuite directement pris en charge par le concept de stockage.

5.2.2. Deux barrières sur le colis

Pour minimiser les charges aux générations futures (peu ou pas d'intervention dans l'installation après remplissage, ELD « passif »), il est intéressant que soit instruite l'option consistant à reporter sur le colis lui-même les deux barrières de confinement (ou plutôt un barrière de confinement elle-même dans une enveloppe de protection). Dans ce cadre, le CEA développe un concept de colis (ou de famille de colis) entreposable et examine avec l'ANDRA sa compatibilité avec le stockage en formation géologique, soit par prise en charge par les surcolisages prévus à l'entrée du stockage, soit par stockage direct du colis entreposé. Le principe même de réalisation de ce « colis final entreposable » constitué (cf. Fig. 4) d'un ou de plusieurs « colis primaires » enfermés dans un complément de colisage ou « conteneur externe » et donnant donc naissance à un colis de coût non négligeable nécessite la recherche d'une compatibilité la plus directe possible avec le stockage. Il est par exemple exclu de proposer une solution aussi coûteuse pour ensuite devoir réaliser un reconditionnement même partiel des colis (« extraction des colis primaires ») avant mise au stockage. Car outre le surcoût qu'entraînerait cette opération ponctuelle, il y aurait en la présence des « conteneurs externes » vidés production de grands volumes de déchets secondaires auxquels il faudrait aussi trouver un mode de gestion adapté. Seul un conteneur externe n'apportant pas une surépaisseur importante (sur-fût EIP en inox par exemple), pourrait garantir à faible coût une possibilité de surcolisage direct en entrée du stockage.

Une étude fonctionnelle a déjà permis de mettre en évidence des points communs des concepts des colis entreposables et des colis stockables (i.e. pendant la phase réversible du stockage) :

- intérêt d'une manutention standardisée ;
- utilisation du béton comme matériau de complément de colisage dans le cas d'une compatibilité directe avec le stockage, de l'inox sinon ;



Figure 4. Conteneur double-barrière.

- colis respirant pour évacuation des gaz explosifs ;
- colis ne nécessitant pas de maintenance.

Néanmoins des aspects de maximisation de la compatibilité doivent et vont encore être approfondis, notamment les choix de formes et de dimensions de même que certaines options techniques telles que les modes de fermeture des colis.

Sans attendre la finalisation de l'élaboration des concepts de stockage profond mais tout en veillant à assurer une cohérence vis-à-vis des études de l'ANDRA, le CEA a donc entrepris, dans l'objectif de rationaliser les filières de conditionnement, de lancer immédiatement le développement (correspondant au concept le plus avant-gardiste) d'une gamme de « conteneurs externes entreposables » apte à prendre en charge les déchets B, et notamment ceux qui sont encore non conditionnés, dans un ELD-B à atmosphère non contrôlée (2 barrières sur le colis) tout en assurant la compatibilité avec le stockage.

Le principe retenu est celui d'un conteneur constitué de la manière suivante :

- C'est un(des) « colis primaire(s) » existant(s) qui reçoit les déchets et qui constitue la 1^{ère} barrière de confinement. Dans le cas où ce ne serait pas possible, par exemple pour prendre en charge des déchets en vrac de chimie variée, un « conteneur primaire » est en cours de développement. Les matériaux explorés sont l'acier émaillé, la céramique ou le polyéthylène.
- Une partie externe appelée « conteneur externe » qui reçoit un ou plusieurs « colis ou conteneurs primaires » et constitue la 2^{ème} barrière. Il semble que le béton soit un matériau à privilégier pour réaliser ce conteneur.

Ce principe permettra, dans le cas où aucune performance de confinement n'est allouée à l'ELD-B, d'assurer de manière optimale d'un point de vue technique mais aussi économique les fonctions liées à la sûreté et à la durabilité.

À ce jour, des premiers choix de conception ont été proposés, qui se concrétisent par la réalisation de démonstrateurs fonctionnels destinés à tester, sur ces concepts d'objets les fonctions de confinement et de reprise vis-à-vis de la longue durée. Pour ce faire, des tests de caractérisation comportementale vont être réalisés sur des objets de taille représentative et en conditions réelles : la tenue des matériaux retenus pour les conteneurs « primaire » et « externe », l'optimisation des modes de fermeture (« conteneur externe » mais aussi « conteneur primaire » s'il y a lieu) et des modes de gestion des gaz de radiolyse seront les points principaux étudiés.

Dans un deuxième temps, pour 2004, la réalisation d'un ou de plusieurs « démonstrateurs technologiques » permettra la validation de la fabrication industrielle ainsi que l'intégration de l'ensemble des composants.

De plus, ce processus de démonstration et de développement suivra et intégrera toutes les évolutions nécessaires pour rester en cohérence avec le concept de stockage de l'ANDRA.

À la fin, pour chaque type de déchet B existant ou à produire il existera donc un conteneur « double-barrière » qui permettra sa prise en charge dans un ELD-B avec une compatibilité avec le stockage.

5.3. 1^{ers} concepts d'ELD-B

Parallèlement à la conception de colis entreposables, sont bien sûr aussi développés les concepts d'ELD-B, s'appuyant sur les mêmes hypothèses de base de répartition des performances (2 barrières) au sein du couple colis-entrepôt (2 options de répartition). Pour chaque option, le choix a été fait de s'intéresser à un ELD-B réalisé en surface ou en sub-surface, tous devant prendre en charge l'ensemble des « colis finaux entreposables » produits à partir de tout l'éventail des « colis primaires » existants ou à venir : ceci correspond à 4 concepts comportant de multiples types d'alvéoles d'entreposage. Les réflexions préliminaires sur les options de sûreté qui en découlent se font en relation avec la DSIN.

Outre la nécessité de veiller à la durabilité des colis, les 2 points critiques (qui d'ailleurs peuvent mettre à mal la durabilité), sont la prise en compte du risque de production gaz à l'intérieur du colis (hydrogène et/ou agents agressifs), avec ses conséquences potentielles que sont les risques de surpression dans le colis

et d'explosion/incendie dans l'ensemble colis-entrepôt, et la gestion des RN volatils et des aérosols, qui doit donner lieu à des débits de dose en installation et des rejets radioactifs « acceptables ».

Si l'on reprend les deux options précédemment évoquées, la prise en compte du risque « gaz » se traduit pour l'ELD-B par :

- Pour une barrière sur le colis et une barrière sur l'entrepôt : « colis primaires » non étanches aux gaz et gestion des gaz par l'entrepôt par ventilation forcée.
- Pour deux barrières sur le colis : « colis primaires » dans des « conteneurs externes » transpirants et gestion des gaz par l'entrepôt par ventilation naturelle.

Une étude d'APS est ainsi en cours de réalisation sur ces concepts d'ELD-B et de premiers résultats, dont une image technologique de l'entrepôt (site virtuel), ont été obtenus concernant un ELD-B surface dans le cas de l'option 2 (colis double-barrière).

Il est clair que contrairement au stockage profond en couche géologique, un site d'entreposage ne requiert pas de caractéristiques de site autres que celles que demandent les INB classiques. Le choix de la localisation du site n'étant pas indispensable à ce stade de la réflexion et il a été décidé de laisser la question en suspend pour éviter d'éviter d'exclure des sites. Il est aussi évident que lorsque le choix sera nécessaire, les risques sismiques, de chute d'avion, . . . devront être minimisés.

Pour l'ELD-B surface dans le cas de l'option 2, donc, la Fig. 5 montre un plan de situation de l'installation où sont visibles des alvéoles d'entreposage de « colis finaux entreposables » (dénommés CUBE pour « Colis Universel de déchets B en Entreposage ») correspondant à toutes les familles de « colis primaires », mais également les bâtiments des servitudes et ceux communs à l'ensemble des colis (caractérisation, reconditionnement, entrepôt de CUBE neufs. . .). Les Figs. 6 et 7 donnent le détail de l'implantation des « CUBE-bitume » dans les alvéoles. Remarquons au passage que chacun de ces « colis finaux entreposables » renferme ici 7 « colis primaires ».

Si l'on se place dans le cas de l'option 1, le colis entreposés vont pouvoir être très proches des « colis primaires », les études spécifiques concernant la ventilation, les structures de génie civil et la manutention devront être revues mais l'ELD-B pourra certainement être plus compact.

Concernant les « sites virtuels sub-surface », ils vont être élaborés sur la base d'une étude déjà réalisée depuis 1998, agrémentée de tous les derniers développements des concepts de colis que nous avons déjà détaillés.

5.4. Localisation de l'ELD-B – Transport des colis

Jusqu'à présent, le choix de proposer un ELD-B centralisé ou des ELD-B « régionaux » de préférence ou non à proximité d'un site de stockage profond n'a pas été débattu. Le « site virtuel » précédemment présenté a été dimensionné pour prendre en charge l'ensemble des déchets B, ce qui ne présuppose en rien du choix final.

Un fil conducteur intéressant à suivre pour faire une analyse pertinente de cet aspect est le problème des transports, comment va-t-on s'y prendre pour faire le lien entre :

- les 3 sites de production et d'entreposage « industriel » que sont La Hague, Marcoule et Cadarache d'une part,
- et le site du stockage profond lorsqu'il sera décidé d'autre part ?

Il paraît acquis que s'il voit le jour, le site du stockage profond sera unique et que donc tous les colis de déchets B devront y converger.

100 000 m³ de déchets représentent presque autant de « colis primaires » qui s'ils devaient tous être regroupés en un point géographique donné conduirait, en se référant aux normes du transport routier non exceptionnel ($\varnothing_{\text{ext}} < 2.5$ m, hauteur < 3 m, masse < 25 t), à quelques dizaines de milliers de transports : ceci représente un coût important, va entraîner un trafic considérable qui va s'étendre sur un grand nombre d'années (dépendant des moyens mis en œuvre).

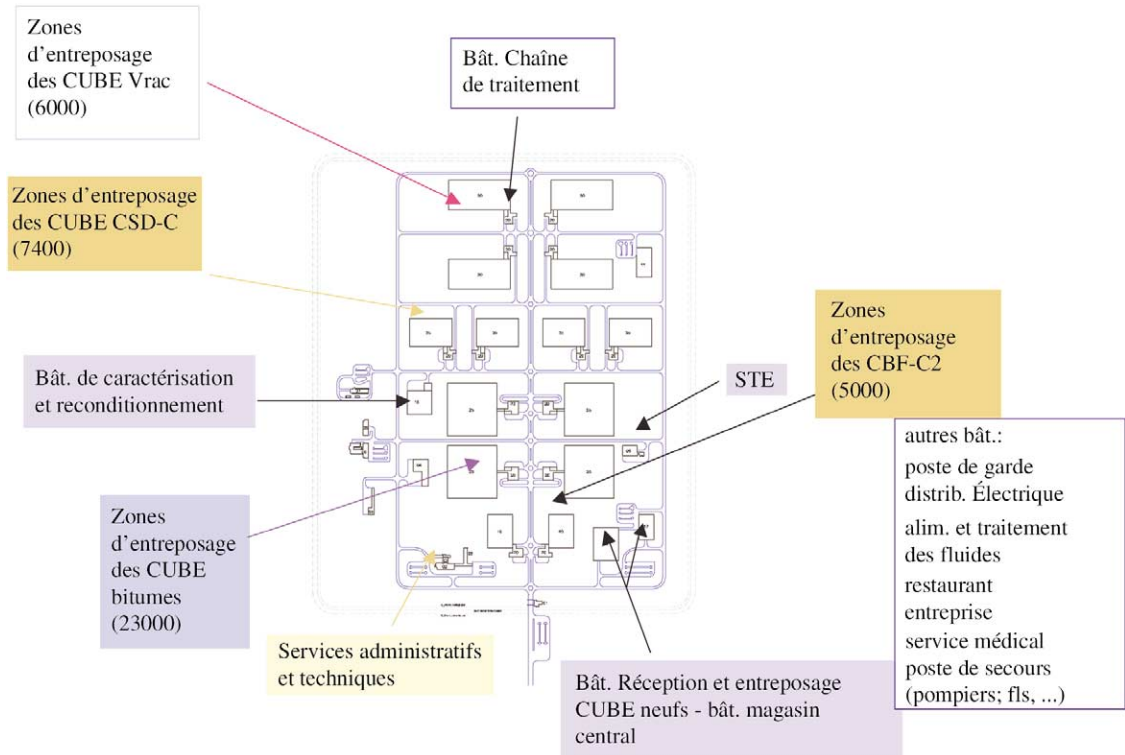


Figure 5. Plan de masse ELD-B.

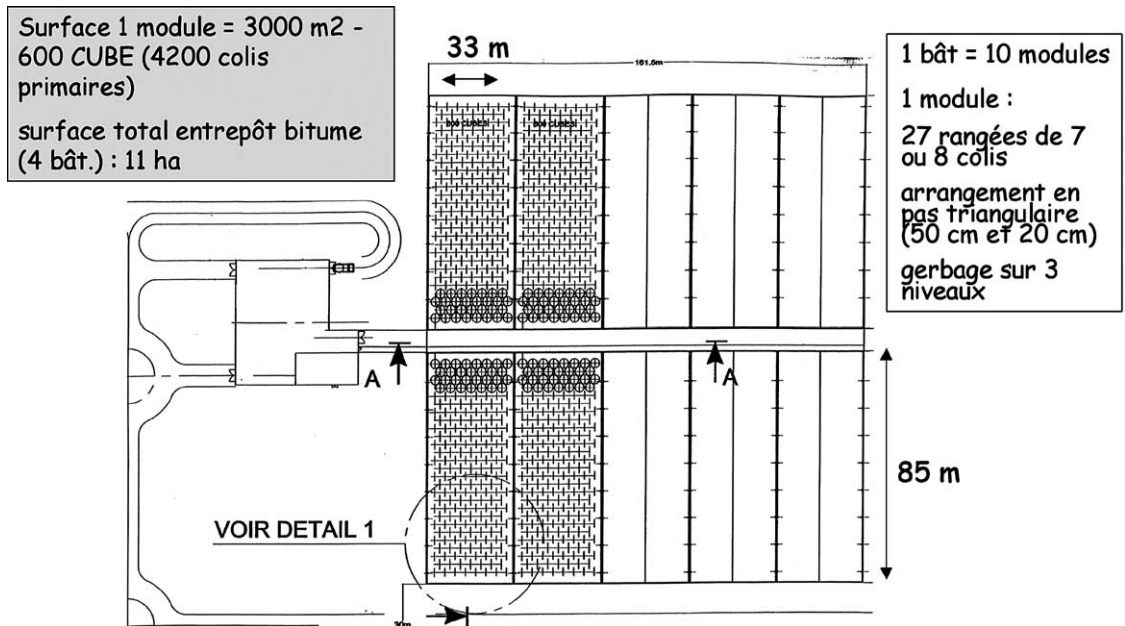


Figure 6. Alvéole bitume ELD-B.

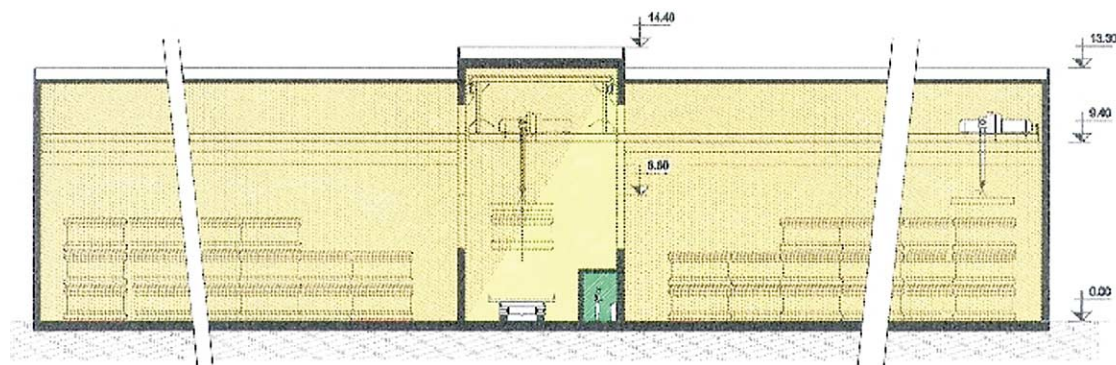


Figure 7. Alvéole bitume ELD-B (vue transverse).

Il semble difficilement envisageable que cette campagne de transports soient réalisée soit répétée plusieurs fois. De plus il semble que le transport de « colis finaux entreposables » double-enveloppe risque d’être fortement pénalisant et contraint donc la compatibilité directe avec le stockage.

Les conclusions simples sont donc les suivantes :

- Un ELD-B dans lequel serait entreposé des « colis finaux » bien plus « volumineux » et « massiques » que le « colis primaire » sera unique et situé à proximité du stockage profond. Les « colis primaires » y seront acheminés pour conditionnement avant entreposage. L’inconvénient majeur est que la décision de la localisation de l’ELD-B nécessite au préalable la connaissance de la localisation du site du stockage.
- Dans le cas contraire il paraît acceptable d’avoir plusieurs ELD-B régionaux (3 ?) puis d’acheminer ensuite les colis à l’issue de l’entreposage, après leur avoir fait subir ou non un reconditionnement léger, vers le site de stockage. Le seul avantage important serait de pouvoir réaliser l’entreposage longue durée avant d’avoir décidé le stockage et la localisation du site de stockage.

6. Conclusion

La problématique de la gestion des déchets B est, comme on vient de le voir, par rapport aux autres déchets, particulière de plusieurs points de vue :

- ce sont des déchets non valorisables, que l’on peut considérer comme ultimes, et dont l’exutoire naturel paraît être le stockage géologique ;
- les quantités produites jusqu’à aujourd’hui correspondent à la moitié de ce qui est attendu au final ;
- leur variété est étendue, tant chimique, que radiologique, qu’en terme de familles de colisage.

Néanmoins, même si des opérations de reprise de déchets anciens, non stabilisés, ou non conditionnés sont en cours, la plupart des déchets B ont reçu un conditionnement convenable conférant aux colis des propriétés de confinement et de reprise satisfaisantes et sont aujourd’hui entreposés de façon sûre et durable.

L’attente avant que le stockage ne soit décidé, puis que l’installation soit opérationnelle va être d’une durée indéterminée mais qui peut s’avérer longue (plusieurs siècles ?). L’opportunité de réaliser un ELD-B est donc instruite et donnera ses conclusions lors de l’échéance de la loi de 91. Pour atteindre ces objectifs, les axes majeurs de R&D sont :

- chercher à rendre les installations plus robustes ;
- assurer la disponibilité d’un mode de conditionnement pour tous les déchets B ;
- faire une optimisation technico-économique d’ensemble.

Discussion

Question de J. Dercourt

Dans les entreposages des déchets B, vous avez eu de nombreuses fois à développer les ciments, les bétons. Le CEA conduit-il des travaux sur ce matériau seul ou avec les entreprises industrielles du secteur ? Avez-vous des bases scientifiques spécifiques qui fondent les matériaux intéressés ?

Réponse de M. Tallec

Que ce soit pour les applications relatives au conteneurage de déchets ou à la conception des infrastructures pour les entrepôts associés (et ultérieurement pour la cimentation des déchets ou la conception des enceintes des centrales nucléaires), la préconisation de matériaux à base de liant hydraulique repose sur une optimisation des combinaisons permettant de répondre aux divers critères pouvant être imposés, comme :

- Quelles sont les fonctions demandées à l'objet ou à la structure : maintien mécanique ; protection chimique ; barrière de confinement vis-à-vis du relâchement des radionucléides ou des polluants chimiques ; barrière de radioprotection ; durabilité dans le temps des performances précédentes ; ... ?
- Quelles sont les contraintes technico-économiques imposées : géométrie et dimensions de l'objet ou de la structure, imposées soit pour le transport, soit pour le maintien mécanique, soit pour l'emprise au sol, ... ; coût ; compatibilité physico-chimique avec d'autres constituants de l'objet/de la structure ou de l'ensemble du concept. Par exemple : compatibilité chimique avec le déchet et vice-versa, résistance à la température dégagée par les déchets irradiants /chauffants, compatibilité entre la capacité à évacuer les gaz et leur production ... ; réversibilité du système (système d'ouverture du colis, de reprise du colis...).
- Quelles sont les conditions de service nominales et accidentelles à prendre en compte : immersion (résistance chimique) ; température ; chute ; ventilation.

Le poids relatif de chacun des critères est aussi à prendre en compte.

Le CEA n'a pas vocation à développer des formulations de bétons, mais plutôt à définir (via la R&D) les critères nécessaires à l'obtention et au maintien dans le temps des propriétés requises pour répondre aux différentes spécifications mentionnées (liste non exhaustive) ci-dessus.

Ainsi, le CEA développe en collaboration avec de nombreux laboratoires industriels, privés ou universitaires (voir ci-après) des études/de l'expertise relatives aux propriétés des bétons intéressant la sûreté, et au maintien de ses propriétés dans le temps.

Il s'agit essentiellement des propriétés mécaniques, chimiques et de confinement (transport et rétention) dont on souhaite conserver la durabilité quelles que soient les contraintes imposées au matériau :

- comportement chimique en milieu saturé ou insaturé : comportement sous eau en présence de différents polluants, carbonatation atmosphérique, corrosion des armatures des bétons ferrailés ;
- comportement thermique : à haute température, gel/dégel, cycle thermique journalier ;
- comportement mécanique : chute, compression, fissuration liées à des phases néoformées (précipitation d'ettringite ou de produits de corrosion ...) ;
- comportement sous irradiation : radiolyse de l'eau cimentaire, production et dégagement d'hydrogène ...

Si l'ensemble est à coupler bien sûr aux règles classiques de génie civil pour la formulation de matériaux cimentaires et la construction d'ouvrages, la spécificité de l'approche réside notamment dans les durées qui sont à prendre en compte, bien supérieures aux quelques dizaines d'années considérées pour les ouvrages en BTP, et aux nombreux couplages de phénomènes mis en jeu qui sont, de fait, à prendre en compte.

Les travaux sont ainsi axés sur la compréhension des phénoménologies mises en jeu et leur modélisation (établissement et l'utilisation de lois de comportement), via l'expérimentation et le développement des outils adaptés aux calculs et/ou à la prédiction à long terme.

La démarche est essentiellement fondée sur une approche générique, élémentaire et paramétrique du matériau cimentaire permettant ensuite une intégration pour l'application aux objets et/ou structures en bétons.

L'ensemble de ces travaux de R&D et d'expertise est réalisé en interne CEA (collaboration de différentes équipes de compétences (matériau, modélisation, simulation . . .) et/ou en externe en collaboration avec les industriels du bâtiment, les cimentiers (développement de ciments spécifiques), les experts (laboratoires) du génie civil (LCPC, ENS CACHAN, INSA Lyon ou Toulouse . . .).

En interne, par exemple, a été conçu un béton de radioprotection dit « haute performance » à base de ciment alumineux ou portland et de granulats d'hématite, dont les intérêts sont principalement d'avoir une forte conductibilité thermique (évacuation de la chaleur produite par le terme source déchet, résistance à la température et mécanique), un bon coefficient d'atténuation des rayonnements et de limiter les épaisseurs de béton nécessaires à la construction (intérêts auxquels on peut opposer le surcoût associé).

En externe, toujours par exemple, des études ont été développées avec la société Bouygues sur la faisabilité et la durabilité d'un conteneur de déchets B à base de BPR – Béton à Poudre Réactive – dont la formulation et la préparation (peu d'eau, faible granulométrie des composants, cure thermique, . . .) confèrent au matériau une très forte compacité et donc des propriétés de confinement intéressantes pour la sûreté.