Comportement à long terme des verres nucléaires de type R7T7

Bilan des connaissances près de l'échéance de la loi Bataille

Stéphane Gin et Isabelle Ribet

Résumé Après une phase d'entreposage en surface ou subsurface, les verres R7T7 destinés au confinement des déchets de haute activité issus du traitement des combustibles usés seront probablement stockés en formation géologique profonde. A très long terme, l'eau conduira à la dégradation progressive du verre et au relâchement très lent dans le champ proche d'une partie des radioéléments qu'il contenait. Cet article fait le point sur les connaissances acquises sur le comportement des verres et montre comment ces connaissances sont utilisées pour prévoir les performances du verre en stockage géologique.

Mots-clés **Conditionnement des déchets, corrosion par l'eau, lixiviation, modélisation.**

Abstract **Long term behaviour of R7T7 nuclear glasses: synthesis of scientific knowledge**
After a period of interim storage, the R7T7 glasses designed for the high-level radioactive waste generated from spent fuel reprocessing will be probably stored into a deep geological formation. In the very long time, water will lead to the degradation of the glass and to the release in the nearfield of a part of the radionuclides. This article reviews the knowledge on the behaviour of glasses and shows how this knowledge is used to predict in a suitable manner the glass performance in repository condition.

Keywords **Waste conditioning, water altering, leaching, modelling.**

Figure 1 - **Colis de verre R7T7**.
Un colis pèse 400 kg et contient 150 litres de verre.

Dès le début de l'industrialisation de la filière électronucléaire, des solutions permettant de se prémunir contre la nocivité des déchets ont été recherchées. Le conditionnement des radionucléides présents dans les solutions de produits de fission issues du traitement des combustibles usés fit l'objet d'intenses recherches. Celles-ci se sont orientées vers des matrices solides capables d'accommoder dans leur structure un grand nombre d'éléments, produits de fission et actinides mineurs provenant de la combustion de l'oxyde d'uranium en réacteur nucléaire. Cette fonction de très large accommodation chimique a conduit à l'adoption de structures vitreuses, dont le désordre constitutif est ainsi mis à profit.

Ainsi naquirent les verres R7T7 du nom des ateliers de vitrification de La Hague dans lesquels ils sont élaborés (voir *encadré*).

Données de base sur le verre R7T7

A ce jour, plus de 10 000 colis de 400 kg de verre chacun ont été produits par COGEMA dans les ateliers de La Hague. L'activité totale confinée dans ces verres atteint quelques 60 millions de curies α ($2{,}2.10^{18}$ Bq) et 4 milliards de curies $\beta\gamma$ ($1{,}5.10^{20}$ Bq).

Pour permettre leur manutention et faciliter leur gestion, les verres sont conditionnés dans des conteneurs métalliques (*figure 1*).

Le *tableau I* montre le domaine de composition de ces verres. Au sein de ce domaine, les propriétés de base des verres comme l'homogénéité et la durabilité chimique sont garanties.

Les études de comportement à long terme ont pour objectif de comprendre l'évolution du verre sous sollicitations internes (auto-irradiation, chaleur) et surtout externes (notamment l'altération par l'eau) en vue de modéliser le taux

Tableau I - Domaine de composition du verre R7T7 (% massique).

	Composition nominale	Intervalle spécifié	
		min	max
SiO_2	45,1	42,4	51,7
B_2O_3	13,9	12,4	16,5
Al_2O_3	4,9	3,6	6,6
Na_2O	9,8	8,1	11,0
CaO	4,0	3,5	4,8
Fe_2O_3	2,9		< 4,5
NiO	0,4		< 0,5
Cr_2O_3	0,5		< 0,6
P_2O_5	0,3		< 1,0
Li_2O	2,0	1,6	2,4
ZnO	2,5	2,2	2,8
Oxydes de produits de fission, de Zr, d'actinides et de fines	12,8	4,2	18,5
Oxydes d'actinides	0,9		
$SiO_2 + B_2O_3 + Al_2O_3$		> 60	

de relâchement des radioéléments en situation de stockage géologique[1].

L'activité contenue dans les matrices vitreuses est en principe susceptible de causer des modifications structurales (défauts dus aux rayonnements émis, génération d'atomes d'hélium…). Les études menées sur l'auto-irradiation des verres (*figure 2*) montrent que ces perturbations resteront faibles à toutes les échelles de temps, et ce grâce à la souplesse du réseau vitreux qui le rend très peu sensible à ces perturbations structurales. Il en est de même pour la température qui n'est pas en mesure d'activer la cristallisation du verre. Les mécanismes d'altération à considérer pour quantifier le relâchement des radioéléments sont par conséquent ceux qui résultent de l'action de l'eau souterraine après resaturation du site et dégradation des enveloppes métalliques.

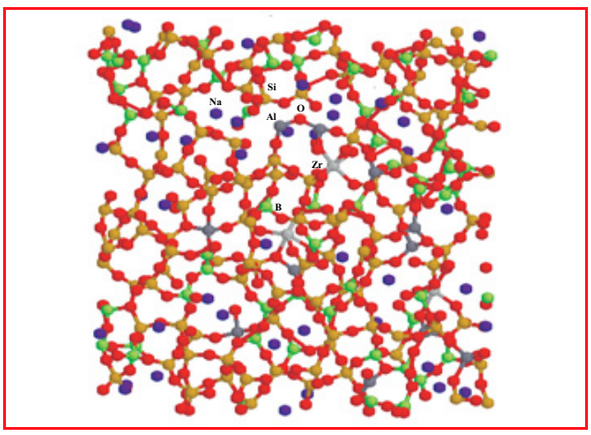

Figure 2 - **Structure simulée par dynamique moléculaire d'un verre nucléaire simplifié**.
Les atomes considérés, à savoir O, Si, B, Na, Al, Ca et Zr, représentent plus de 85 % en mole de la composition du verre R7T7. C'est à partir de simulations à l'échelle atomique de ce type que les principaux mécanismes impliqués dans les processus d'auto-irradiation ont pu être identifiés.

Mécanismes d'altération par l'eau et cinétiques réactionnelles

En présence d'eau, le verre R7T7, comme la plupart des borosilicates, est le siège de phénomènes variés, attribuables pour certains à la nature des liaisons chimiques au sein de la structure vitreuse, et pour d'autres, aux propriétés des espèces dissoutes. Parmi les principaux mécanismes, citons : les échanges d'ions (interdiffusion), l'hydrolyse des éléments formateurs du réseau vitreux, la condensation à l'interface réactionnelle d'une fraction de la silice hydrolysée ainsi que des éléments faiblement solubles, ou encore la précipitation de phases secondaires à partir d'espèces aqueuses [1]. Examinons ces mécanismes :

Le terme d'interdiffusion recouvre généralement la diffusion de l'eau dans le verre et l'échange entre les protons et les alcalins faiblement liés au réseau vitreux. C'est un phénomène mineur dont la seule conséquence est l'élévation du pH.

L'hydrolyse quant-à-elle conduit à une dissolution congruente du verre. Ce mécanisme est activé d'une part par la température et d'autre part par les ions H^+ et OH^-. Le bore ayant un fort pouvoir tampon, le pH se stabilise rapidement autour de 9, valeur limite au-delà de laquelle la solubilité de la silice augmente fortement.

La condensation *in situ* d'une partie des éléments hydrolysés est à l'origine de la formation d'un gel (matériau amorphe, poreux et hydraté) qui peut devenir passivant, notamment si le taux de condensation de la silice est élevé. Un gel passivant limite fortement le transfert des espèces réactives, et donc l'altération du verre. En condition de stockage, il est attendu que le gel joue un rôle passivant et piège de surcroît les radioéléments par des mécanismes de sorption et co-précipitation. La stabilité à long terme du gel a fait l'objet d'études approfondies, que ce soit pour définir son domaine de stabilité ou juger de sa pérennité. A ce titre, les travaux sur les analogues naturels comme la palagonite[2] se sont révélés extrêmement précieux.

Aux températures d'intérêt du stockage (25-90 °C), la précipitation de phases secondaires conduit majoritairement au développement de phyllosilicates à l'interface gel-solution. Les éléments majeurs du verre comme Si et Al sont partagés entre le gel et les phases secondaires.

La *figure 3* montre à titre d'illustration les produits d'altération du verre R7T7 formés après quelques mois en eau pure.

La cinétique d'altération du verre R7T7, que l'on mesure expérimentalement à partir des éléments traceurs comme le bore ou le sodium passés en solution, dépend de la composition du verre, du progrès de la réaction et des conditions de l'expérience (pH, température, taux de nouvellement de la solution, rapport surface de verre sur volume de solution (S/V), composition de la solution et des autres matériaux solides simulant les différentes barrières de confinement…). Pour illustrer la succession des mécanismes contrôlant la cinétique de dissolution du verre, on peut prendre l'exemple d'un test statique qui consiste à mesurer la cinétique d'altération d'un échantillon de verre sain placé dans de l'eau initialement pure. On est amené à distinguer ainsi plusieurs régimes successifs (*figure 4*) : relâchement préférentiel des alcalins, vitesse initiale, chute de vitesse de plusieurs ordres de grandeur et vitesse résiduelle. Dans des conditions de pH très basiques (pH > 10,7 à 90 °C), des reprises d'altération peuvent également survenir [2], mais les conditions d'occurrence d'un tel phénomène ne sont pas pertinentes vis-à-vis du stockage géologique. Les modèles prévoient en effet un

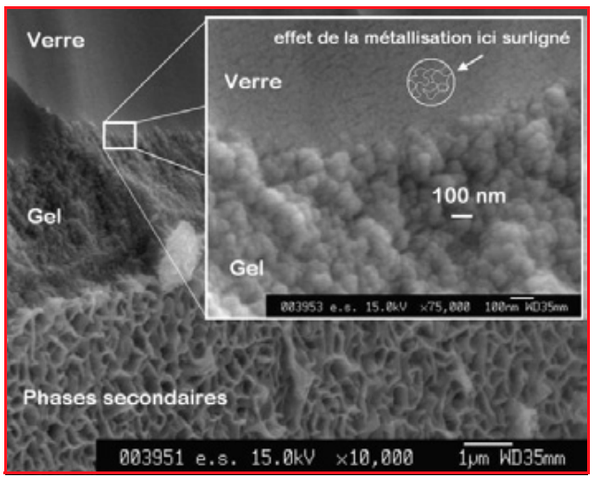

Figure 3 - Image MEB d'un échantillon de verre R7T7 altéré quatre mois en eau initialement pure et à 150 °C.
Cette image en semi-profil permet de distinguer successivement la couche externe de phyllosilicates précipités à partir de la solution, le gel poreux formé par condensation *in situ* et le verre sain sous-jacent.

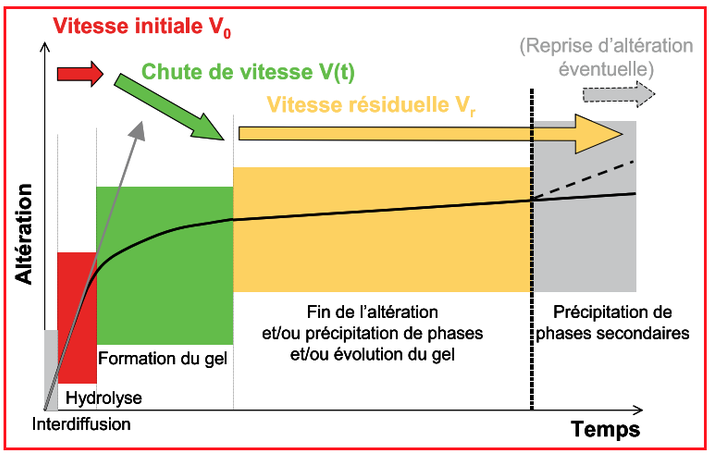

Figure 4 - Représentation schématique des mécanismes prépondérants contrôlant la cinétique d'altération du verre.
Ce schéma peut s'appliquer à tout type de verre, mais selon les compositions envisagées et les conditions d'altération, les différentes phases auront des développements plus ou moins importants, voire nuls (ainsi, les reprises d'altération ne sont pas applicables aux verres R7T7 ou seulement dans des situations extrêmes).

pH au contact du verre au plus égal à celui imposé par le verre, à savoir 9,5.

Le *tableau II* donne les temps caractéristiques de ces différents régimes cinétiques pour une expérience type, réalisée sur le verre R7T7 de référence à la température de 90 °C et pour un rapport S/V de 10 cm^{-1} (cela correspond à une lame d'eau de 100 µm sur la surface du verre).

Ces faits expérimentaux appellent plusieurs remarques :

• On a signalé plus haut que la forte chute de la vitesse d'altération du verre était attribuable à la formation d'un gel passivant. Il faut comprendre par là que les réorganisations au sein du gel conduisent à une fermeture partielle voire totale de la porosité : des simulations à l'échelle atomique par des méthodes Monte Carlo, ainsi que des comparaisons de surfaces spécifiques par adsorption de gaz et diffusion de rayons X aux petits angles en attestent [3]. Il faut noter qu'en parallèle à cette approche, il existe toujours un cadre théorique basé sur la théorie de l'état de transition qui conduit certains auteurs à proposer une limitation de la cinétique d'altération du verre par diminution de l'affinité chimique entre le verre hydraté et la solution à l'interface réactionnelle, mais les lois qui en découlent restent largement empiriques car elles n'intègrent pas de description microscopique des processus à l'interface réactionnelle [4]. Ce débat reste toutefois purement académique dans la mesure où les incertitudes conceptuelles qui résultent de ces différentes approches théoriques n'ont pas de conséquences sur les estimations de performances à long terme.

• Au laboratoire, les expériences en **système fermé** montrent qu'un régime résiduel est atteint à partir du moment où la solution est saturée en silice (cette saturation peut être vue comme un équilibre entre le gel et la solution). Le temps d'atteinte de ce régime dépend essentiellement du rapport S/V et varie entre quelques heures et quelques mois. L'épaisseur de verre altéré pendant cette phase transitoire varie de quelques dizaines de nanomètres à quelques micromètres. En **milieu ouvert**, une vitesse résiduelle plus élevée que celle mesurée en statique pourrait perdurer si le taux de renouvellement de la solution permettait d'assurer une lente dissolution du gel en maintenant la solution sous-saturée par rapport à ce dernier. Dans un stockage géologique que l'on peut assimiler à un milieu ouvert mais avec un taux de renouvellement de l'eau très faible, le verre s'altérera à une vitesse proche de celle mesurée au laboratoire à partir de tests statiques, à partir du moment où l'environnement proche du verre est saturé en silice. Actuellement, les études en cours montrent qu'en système fermé, la vitesse résiduelle est constante à l'échelle du laboratoire, mais il n'est pas exclu qu'à plus long terme cette dernière diminue. Plusieurs mécanismes peuvent expliquer cette vitesse : la diffusion de l'eau dans le verre, la précipitation de phases secondaires, l'évolution du gel protecteur (dissolution, maturation de la texture poreuse). Deux résultats importants ont été acquis récemment. Tout d'abord, l'énergie d'activation associée à la vitesse résiduelle du verre R7T7 de référence a été déterminée entre 50 et 180 °C. Elle est constante sur toute la gamme de température et vaut environ 50 kJ/mol. Une telle valeur,

Tableau II - Quelques ordres de grandeur des temps caractéristiques et vitesse d'altération du verre R7T7.
Ces durées sont données à titre indicatif. Elles dépendent dans une large mesure des conditions d'altération.

Régime cinétique	Mécanisme limitant	Durée approximative	Épaisseur altérée
Relâchement préférentiel d'alcalins	Interdiffusion	Quelques secondes	10 nm
Vitesse initiale (V_0)	Hydrolyse du réseau vitreux	1 h	40 nm
Chute de vitesse (V(t))	Formation d'un gel protecteur	1 000 j	430 nm
Vitesse résiduelle (V_r)	Plusieurs mécanismes possibles : étude en cours	Potentiellement jusqu'à l'altération totale du verre	≈ 25 nm/an
Reprise d'altération (uniquement à pH > 10,7)	Précipitation de phases secondaires (zéolites)	Dépend de la vitesse de précipitation de la zéolite	-

intermédiaire entre celle déterminée pour la vitesse initiale (73 kJ/mol) et un phénomène de diffusion pure (≈ 20 kJ/mol) indique qu'un mécanisme de type transport réactif pourrait contrôler ce régime (combinaison possible de plusieurs mécanismes). Ensuite, il a été montré que la vitesse résiduelle est quasi indépendante du rapport S/V, contrairement à la chute de vitesse. Comme la composition de la solution dépend fortement du rapport S/V, ce résultat suggère que le mécanisme associé est indépendant de la composition de la solution, et d'autre part que la vitesse est la même sur toute la surface interne du bloc de verre soumise à l'altération. Compte tenu de son importance sur le long terme, la vitesse résiduelle fait encore l'objet de travaux complémentaires en vue d'en préciser et d'en modéliser les mécanismes clés.

• En conditions de stockage, seuls le temps de formation d'un gel protecteur et le maintien à long terme d'une vitesse résiduelle sont déterminants. L'interdiffusion est considérée comme négligeable et les reprises d'altération hors des conditions d'application.

Les régimes de vitesse initiale V_0, de chute de vitesse V(t) et de vitesse résiduelle V_r ont été paramétrés au sein du domaine R7T7 à partir de travaux basés sur des plans d'expériences. La sensibilité de ces régimes vis-à-vis de la composition du verre est d'un facteur 3 sur V_0, 6 sur la chute de vitesse V(t), et aux alentours de 10 sur V_r.

Influence des matériaux de stockage

Il est établi de longue date que la plupart des matériaux du champ proche (produits de corrosion des conteneurs et argiles* de la barrière ouvragée ou du site) conduisent à augmenter l'altération du verre en consommant une partie des principaux éléments formateurs du gel et notamment le silicium [1]. Cet effet est généralement transitoire et il est possible de le modéliser de façon simple par le biais d'une capacité de sorption de la silice. Les travaux récents menés sur les couplages entre le verre et les matériaux du champ proche montrent d'une part que la surface interne du bloc de verre sera très peu sensible à l'environnement, et d'autre part qu'une séparation physique même minime entre le verre et les matériaux sorbants permet de limiter considérablement cet effet de « pompe à silice » [5].

Modélisation prédictive

Un modèle opérationnel intégrant tous les phénomènes clés décrits plus haut a été développé par le CEA dans le but de prédire le comportement à long terme des verres R7T7 en stockage de la manière la plus robuste et réaliste possible, tout en conservant des marges suffisantes pour tenir compte des incertitudes paramétriques et conceptuelles [6]. Le concept de stockage retenu est basé sur celui proposé par l'Andra. Il considère le colis de verre, un surconteneur en fer de plusieurs centimètres d'épaisseur, une barrière ouvragée argileuse optionnelle et un site argileux.

Le modèle opérationnel fait l'hypothèse conservative que le verre s'altérera en vitesse initiale jusqu'à saturation en silice des produits de corrosion des conteneurs métalliques. Passé ce régime initial, un gel passivant se formera rapidement et conduira au régime de vitesse résiduelle.

Le colis de verre offre à l'eau une surface notablement plus élevée que sa simple surface géométrique car le refroidissement rapide qu'il a subi après son élaboration a conduit au développement d'un réseau de fissures. De manière générale, l'accessibilité de l'eau à ces fissures joue un rôle prépondérant dans le contrôle de vitesse d'altération : moins les surfaces sont accessibles et plus la cinétique d'altération chute rapidement. De ce fait, le régime de vitesse dominant pour la grande majorité des fissures à l'intérieur du bloc de verre devient très rapidement le régime de vitesse résiduelle, alors que les surfaces extérieures peuvent subir plus longtemps un régime de vitesse initiale. Cette caractéristique conduit à définir la notion de « surface utile », qui permet de passer de la vitesse d'altération à la quantité de verre altérée : lorsqu'un bloc de verre est altéré en conditions de vitesse résiduelle, la surface utile correspond à l'ensemble des surfaces développées par le bloc (extérieur et fissures), qui s'altèrent toutes à la même vitesse. Lorsqu'en revanche un bloc de verre est altéré en conditions de vitesse initiale, seules les surfaces aisément accessibles à l'eau s'altèrent effectivement à cette vitesse, et la surface utile est moindre. Le couplage entre la vitesse et la surface utile du colis à été réalisé à partir d'études expérimentales sur colis échelle 1[3] de verre R7T7 inactifs. Ces essais ont conduit à considérer une surface effective de l'ordre de 10 m^2 par colis pour les régimes V_0 et V(t) et de 70 m^2 pour le régime résiduel.

La *figure 5* montre l'évolution de la radiotoxicité relâchée par le colis de verre compte tenu de son altération. Cette

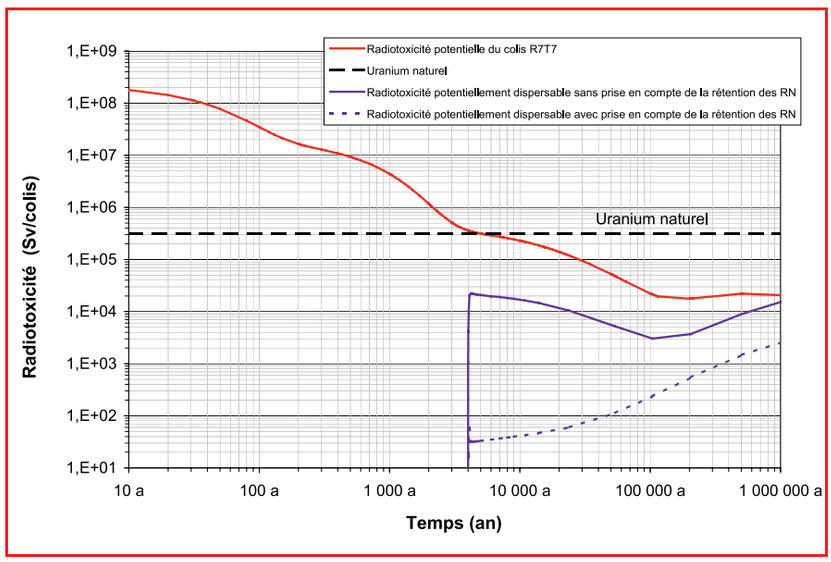

Figure 5 - Exemples de calculs de performance du verre R7T7 en condition de stockage géologique.
Comparaison de la radiotoxicité relâchée du verre du fait de son altération à la radiotoxicité du colis entier et à celle de l'uranium naturel.

activité est donc potentiellement dispersable dans l'environnement. Le calcul est fait en considérant d'abord un scénario d'évolution normal pour lequel l'altération du verre commence à 4 000 ans(4). Les chiffres exprimés en sieverts par colis sont à comparer d'une part à la radiotoxicité potentielle du colis de verre qui diminue au cours du temps grâce à la décroissance radioactive, et d'autre part à la radiotoxicité potentielle de l'uranium naturel(5).

Ces courbes appellent plusieurs commentaires :

• De manière générale, que l'on se projette à 10 000 ou 100 000 ans, le verre R7T7 présente un important pouvoir de confinement vis-à-vis des radioéléments qu'il contient. Par ailleurs, compte tenu des marges prises, on est en mesure de garantir aujourd'hui que dans un scénario normal(6), l'activité relâchée des colis de verre engendrera une radiotoxicité potentielle très inférieure à celle d'un gisement contenant tout l'uranium prélevé au milieu naturel pour fabriquer les combustibles.

• De manière plus détaillée, on peut noter que l'altération du verre procède selon deux régimes principaux. Le premier, assez bref, correspond à la phase de saturation des produits de corrosion des conteneurs métalliques et le second à l'altération du verre en régime résiduel. Le régime de chute de vitesse n'a pas d'influence sur les quantités de verre altéré en raison de sa durée extrêmement brève qui est de l'ordre de un an pour le cas de référence (0,4 µm de verre altéré). Ensuite, la vitesse résiduelle conduit à un relâchement de radioéléments quasi constant au cours du temps. La durée de vie du colis de verre dans ce scénario serait de plusieurs centaines de milliers d'années.

• Dans ce modèle opérationnel, les radioéléments sont relâchés du verre à la même vitesse que le bore, élément le plus mobile du verre. Cette hypothèse est très conservative, car elle n'intègre pas les phénomènes de rétention des produits de fission et actinides dans le gel. La prise en compte de ces phénomènes (courbe pointillée bleue) conduit à un gain supplémentaire d'environ deux ordres de grandeur dans les quelques milliers d'années qui suivent le début de l'altération, puis un ordre de grandeur après.

Validation des modèles

La nécessité de valider la prédiction des modèles vient du fait qu'il n'est pas possible de simuler au laboratoire l'altération des colis de verre sur des périodes géologiques. Les études dites de validation sont de différentes natures. D'une part, les travaux sur les analogues naturels tendent à montrer qu'à l'échelle des temps considérés et quel que soit l'environnement, les verres volcaniques et notamment basaltiques, considérés comme de bons analogues des verres nucléaires, s'altèrent à des vitesses moyennes très inférieures à leur vitesse initiale [7]. D'autre part, les tests intégraux et *in situ* destinés à simuler les couplages dans le stockage indiquent que les phénomènes dominants sont bien intégrés dans les modèles, et par conséquent que les transitoires chimiques sont correctement quantifiés. Comme cela a été dit précédemment, l'effort doit à présent porter sur le régime résiduel dont on connaît peu la sensibilité aux paramètres d'environnement. Les projets européens tels que CORALUS (5e PCRD) et NF-Pro (6e PCRD) permettront de progresser dans cette voie.

Bilan-perspectives

Les études menées sur le verre R7T7 dans le cadre de la loi de 1991* ont permis de bâtir des modèles robustes sur lesquels s'appuie notamment l'Andra pour l'évaluation de leurs performances. Le verre est une matrice de confinement adaptée au stockage profond, mais dont les performances peuvent dépendre de l'environnement. En conséquence, le choix des matériaux constituant les différentes barrières et le design du stockage influent directement sur la durée de vie des verres.

Les études de base devront se poursuivre d'une part pour prendre en compte les futures optimisations de concepts de l'Andra, et d'autre part parce que certaines questions scientifiques nécessitent encore des approfondissements. Parmi elles :

- la compréhension fine et la modélisation mécanistique de la vitesse résiduelle,
- l'approfondissement des connaissances sur les couplages entre le verre et le champ proche par le biais d'expériences spécifiques et l'utilisation de modèles couplés chimie-transport,
- la prise en compte du comportement spécifique des radionucléides* et notamment leur rétention dans les produits d'altération du verre,
- la poursuite des travaux de validation des prédictions à partir d'analogues naturels et archéologiques.

Remerciements

Cette problématique a fait l'objet de travaux scientifiques au CEA depuis le début des années 80, impliquant de nombreux partenariats. Les auteurs remercient la Communauté européenne, la COGEMA, l'Andra et EDF pour leur soutien financier.

Notes

(1) Une période de 10 000 ans est généralement retenue pour les démonstrations de sûreté parce qu'elle correspond à la durée au bout de laquelle l'activité des colis de verre sera équivalente à la radioactivité naturelle du minerai d'uranium qui a servi à fabriquer le combustible.
(2) La palagonite est le terme qui désigne le gel formé au cours de l'altération par l'eau du verre basaltique.
(3) Colis de la même taille que les colis industriels.
(4) Cette durée correspond à la durée d'étanchéité retenue par le surconteneur métallique.
(5) On considère pour ces calculs que 10 t d'uranium naturel ou encore 1,5 t d'uranium enrichis à 3,5 % en ^{235}U ont été nécessaires pour donner en fin de cycle un colis de verre R7T7. La radiotoxicité d'une tonne d'uranium naturel est de $3{,}2.10^{4}$ Sv.
(6) C'est-à-dire pour les conditions thermique, hydraulique et chimique au niveau des alvéoles de stockage évoluant conformément aux prévisions.

Références

[1] Vernaz E., Gin S., Jégou C., Ribet I., Present understanding of R7T7 glass alteration kinetics and their impact on long-term behavior modeling, *J. of Nuclear Materials*, **2001**, *298 (1, 2)*, p. 27.
[2] Ribet S., Gin S., Role of neoformed phases on the mechanisms controlling the resumption of SON68 glass alteration in alkaline media, *J. of Nuclear Materials*, **2004**, *324*, p. 152.
[3] Ledieu A., *Altération par l'eau des verres borosilicatés : expériences, modélisation et simulations Monte Carlo*, Thèse de doctorat, École polytechnique, **2004**.

[4] Grambow B., Muller R., First-order dissolution rate law and the role of surface layers in glass performance assessment, *J. of Nuclear Materials*, **2001**, *298 (1, 2)*, p. 112.

[5] Gin S., Thierry F., Minet Y., Nuclear glass alteration in clay: assessment of the effect of direct contact between the materials through experimental and modeling approach, Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXVII, *Mater. Res. Soc.*, **2004** , *807*, p. 133.

[6] Ribet I., Gin S., Godon N., Minet Y., Jollivet P., Frugier P., Vernaz E., Cavedon J.M., Petitjean V., The V0-Vr operational model for the long-term behaviour of vitrified waste packages, Conférence Atalante 2004, Nîmes, 21-24 juin **2004**.

[7] Crovisier J.L., Advocat T., Dussossoy J.-L., Nature and role of natural alteration gels formed on the surface of ancient volcanic glasses (Natural analogs of waste containment glasses), *J. of Nuclear Materials*, **2003**, *321*, p. 91.

S. Gin

Stéphane Gin est chef du Laboratoire d'étude du comportement à long terme des matériaux de conditionnement au CEA Valrhô*.

I. Ribet

Isabelle Ribet est assistante du chef de service d'étude et comportement des matériaux de conditionnement au CEA Valrhô*.

* CEA Valrhô, DTCD/SECM/LCLT, BP 17171, 30207 Bagnols-sur-Cèze Cedex.
Courriel : GIN@atil.cea.fr

CNRC·NRC
De la découverte à l'innovation...
From Discovery to Innovation...

En partenariat avec / In partnership with
UNIVERSITY OF ALBERTA

200P + i^2 + Eq → INNT

A l'Institut national de nanotechnologie du Canada (INNT) nous savons que notre succès repose sur le rassemblement du meilleur personnel (P) dans les meilleures installations (*i*) avec le meilleur équipement (Eq). Dans quelques mois, nous déménagerons dans un établissement de pointe qui abritera le laboratoire le plus « tranquille » au Canada ainsi que la meilleure collection d'instruments de microscopie électronique et de science des surfaces au pays.

Nous avons besoin des personnes les plus compétentes. Au cours des deux prochaines années, nous allons embaucher des douzaines de nouveaux chercheurs et du personnel de support technique. Pour de plus amples renseignements, visitez notre site Web.

www.nanotech.gc.ca

200P + f^2 + Eq → NINT

At Canada's National Institute for Nanotechnology (NINT), we know that our success will come from bringing together the best people (P) in the best facilities (*f*) with the best equipment (Eq). In a few months, we will be moving into a state-of-the-art facility that includes the 'quietest' lab space in Canada and houses the best collection of microscopy and surface science equipment in the country .

What we need are the best people. Over the next two years, we will be hiring dozens of new researchers and technical support staff. Please visit our website to learn more.

www.nanotech.gc.ca

Canada
Alberta GOVERNMENT OF ALBERTA