

La loi de 1991

Stratégies scientifiques pour une gestion des déchets nucléaires français

Robert Guillaumont

Résumé La loi de 1991 a ouvert une période de recherches multidisciplinaires de 15 ans sur la gestion des déchets nucléaires français de haute activité et à vie longue. Elle a fixé trois orientations aux recherches. En 2006, le Parlement français sera saisi par le gouvernement pour statuer sur la gestion de ces déchets. Les résultats des recherches constitueront une pièce maîtresse du dossier sur lequel seront fondées les décisions. La communauté scientifique française s'est progressivement mobilisée à partir de 1992, et au-delà des scientifiques généralement impliqués dans le nucléaire. Aujourd'hui, la recherche sur les déchets nucléaires a une dimension internationale. Elle a produit un impressionnant corpus de connaissances et suscité de nombreuses réflexions. On examine ici les principaux acquis des recherches conduites en France dans le contexte de la loi de 1991. On verra que la chimie y a joué un rôle majeur.

Mots-clés **Déchets nucléaires, transmutation, stockage, entreposage.**

Abstract **The Bataille's law: scientific research for nuclear wastes in France**
The French law passed on 1991 has opened a 15 years period for a broad multidisciplinary area of researches on long lived nuclear wastes. The law clearly asked for three directions for these researches. In 2006 the French Parliament will be asked by the French government to discuss and make statements about the management of these wastes. The results of the researches will be a master piece for decisions. The French scientific community has been progressively involved in many fields of researches and today nuclear waste management is an international scientific topic. A considerable amount of results has been obtained, which are here briefly reviewed with regard to those obtained in France according to the law, with a major role for chemistry.

Keywords **Nuclear wastes, transmutation, storage, geological disposal.**

Les déchets nucléaires français sont essentiellement produits par l'exploitation de l'énergie nucléaire de fission pour produire de l'électricité. Il y a 58 réacteurs électrogènes REP*, mis en service entre 1970 et 2000, totalisant une puissance de 60 GWe* et produisant 410 TWh* par an. Les déchets de faible activité qui renferment des radionucléides* à vie courte, de périodes* radioactives inférieures à 30 ans (15 000 m³/an), ont des filières d'élimination [1] et leur gestion ne pose plus de réels problèmes scientifiques [2]. En revanche, ceux qui renferment des radionucléides à vie longue (périodes radioactives de centaines mais surtout de dizaines de milliers d'années) posent des problèmes scientifiques de gestion à long terme qui sont bien identifiés [2]. Ces déchets sont conditionnés en colis primaires. Les colis dits MAVL (« moyenne activité à vie longue », 320 m³/an) sont non thermiques, contrairement aux colis de déchets HAVL (« haute activité à vie longue », 120 m³/an). Les combustibles électronucléaires usés (CU, 1 200 t/an dont 100 t de MOX*) ne sont pas considérés en France comme des déchets HAVL. Il existe aussi en France des déchets nucléaires miliaires. Le *tableau 1* donne la nomenclature opérationnelle des déchets radioactifs englobant les déchets nucléaires, dénomination consacrée à ceux provenant de l'électronucléaire.

L'enjeu scientifique de la gestion des colis de déchets ultimes est finalement de comprendre le retour à l'Homme

des radionucléides, à partir des meilleurs colis de déchets dans lesquels ils sont, ou seraient conditionnés et confinés, et cela sur des périodes de temps pouvant être incommensurables avec les temps habituellement pris en compte pour les projets scientifiques [3]. On peut dire, en dernière analyse, que toute la recherche sur les déchets nucléaires vise cet objectif. Pour trouver des solutions concrètes de gestion et applicables dans les décennies qui viennent, des recherches sont en cours dans tous les pays nucléaires. En France, ces recherches sont encadrées par une loi qui arrive à échéance en 2006. A cette date, des décisions seront prises par le Parlement. La loi a défini trois voies de recherches : séparation-transmutation des radionucléides les plus radio-toxiques, stockage géologique et entreposage de longue durée des colis primaires de déchets. En 12 ans, la communauté scientifique (française, européenne et internationale), qui s'est progressivement mobilisée, a produit un ensemble conséquent de connaissances sur lequel le Parlement appuiera en partie ses décisions en 2006. Les stratégies scientifiques suivies et les principaux résultats acquis susceptibles de conduire à une « industrialisation » sont examinés dans cet article. Cela laisse de côté de nombreux aspects fort intéressants des recherches [4]. La chimie a été particulièrement sollicitée car elle intervient dans les trois voies. Les recherches, notamment en chimie, devront se poursuivre après 2006 car l'« exécution de la loi » a conduit

à des réflexions stratégiques sur le devenir de l'énergie nucléaire, qui apparaît ne plus pouvoir exister sans « chimie intensive ».

Le problème du devenir des déchets nucléaires ultimes à vie longue (MAVL et HAVL, et des CU s'ils prenaient un jour le statut de déchets) ne peut pas être résolu sans aborder l'aspect sociétal, centré sur la maîtrise des risques (de nature radiologique) en fonction d'un temps s'étendant bien au-delà du temps historique de l'humanité. Cet aspect n'est pas traité ici.

Cet article reste très général et renvoie à des références récentes elles aussi très générales.

La loi de 1991

La loi n° 91-1381 du 30 décembre 1991 (répertoriée aujourd'hui au Code de l'environnement sous l'article L 542) donne dans son article 4 trois orientations aux recherches à conduire durant une période de 15 ans pour que le Parlement puisse disposer en 2006 d'éléments scientifiques et techniques à l'appui des décisions qu'il prendra concernant la gestion des déchets nucléaires. L'article 4 stipule que les recherches doivent être conduites simultanément pour :

- La recherche de solution permettant la séparation et la transmutation des éléments radioactifs à vie longue présents dans ces déchets (déchets radioactifs à haute activité et à vie longue dont les dénominations plus précises sont maintenant déchets nucléaires MAVL et HAVL) ;
- L'étude des possibilités de stockage réversible ou irréversible dans des formations géologiques profondes, notamment grâce à la réalisation de laboratoires souterrains ;
- L'étude de procédés de conditionnement et d'entreposage de longue durée en surface de ces déchets.

Les orientations de ces trois voies de recherches, connues sous les noms d'axes 1, 2 et 3 de la loi, correspondaient à la situation du nucléaire français de l'époque où cette loi a été adoptée. Le retraitement des CU était déjà une réalité industrielle à La Hague, avec la perspective de recycler le plutonium et l'uranium dans des réacteurs à neutrons rapides, et le stockage géologique était une option envisagée, mais contestée, pour l'élimination des « déchets à vie longue » de la biosphère (moratoire de février 1990). Les recherches indiquées dans les axes 1 et 2 de la loi sont directement rattachées à cette situation. Celles indiquées dans l'axe 3 s'y rattachent indirectement puisque le conditionnement des déchets et l'entreposage des colis en

résultant, sont une pratique indissociable du retraitement des CU et du stockage géologique. La notion d'entreposage de longue durée en surface introduite par la loi visait des périodes de temps au-delà des pratiques courantes d'exploitation, autorisées en général pour 50 ans. Par ailleurs, des réflexions avaient eu lieu à propos de la « gestion des déchets radioactifs » au sein de plusieurs Commissions, qui ont inspiré ces orientations [5].

Le gouvernement a désigné le CEA comme responsable des recherches concernant les axes 1 et 3 et l'Andra (agence créée par la loi de 1991, article 13) comme responsable des recherches de l'axe 2. La communauté scientifique française (CNRS, Universités, EDF, COGEMA et Framatome-ANP, CEA et Andra) s'est progressivement mobilisée sur ces axes. Ces organismes sont devenus ce que l'on appelle « les acteurs de la loi ». La loi a aussi créé la Commission nationale d'évaluation (CNE) chargée d'évaluer les recherches et d'en rendre compte chaque année au gouvernement. De 1994 à aujourd'hui, la CNE a produit 10 rapports rendus publics qui donnent l'état et l'évolution des recherches au fil des années [6]. Elle doit adresser au gouvernement un rapport final au terme de la loi.

Depuis 1991, des décisions gouvernementales ont été prises qui, sans remettre en cause les orientations de recherche de la loi, ont influé sur les recherches (recentrages par exemple). Il s'agit du report sur Phénix d'expériences prévues sur Super-Phénix (arrêté en 1997), de l'affirmation de la réversibilité du stockage géologique (qui s'est révélée être une exigence sociétale), de la création d'un laboratoire de recherche à Bure dans l'argilite du Callovo-Oxfordien, de l'abandon de la recherche d'autres sites potentiels de stockage en France pour étudier d'autres roches que l'argilite, de l'étude de l'entreposage de très longue durée en sub-surface, en plus de la surface. Un aléa majeur est survenu, l'arrêt des travaux à Bure pendant un an (mai 2001-avril 2003) suite à un accident mortel, et des retards ont été pris par les acteurs de la loi y compris par les pouvoirs publics, les uns et les autres n'ayant pas toujours pris conscience du temps qui passait.

Le CEA, qui conduisait avant 1991 des recherches sur le cycle du combustible nucléaire, a été le premier à les orienter pour tenir compte de la loi. L'Andra, agence créée comme organisme indépendant en 1991 par la loi, a mis plusieurs années à être opérationnelle. Elle a pris le relais de l'Andra-CEA qui avait déjà conduit des recherches de sites de stockage géologique (1984-1990). Le CNRS et les universités ont été longs à réagir à des orientations très loin de leurs préoccupations. Seul l'IN2P3 a mis en place un modeste

Tableau I - Nomenclature opérationnelle des déchets radioactifs fondée sur la période des radionucléides majeurs contenus dans les colis primaires de déchets et leur activité.

Une période très courte est typiquement de 5 ans et courte de 30 ans. Les volumes indiqués sont ceux des colis primaires de déchets (excepté pour les déchets TFA non conditionnés) ou des combustibles usés (CU), attendus en fin d'exploitation et de démantèlement de l'outil industriel actuel. D'après [8].

Période	Très courte	Courte	Longue
Activité			
Très faible	Attente de la décroissance radioactive	Stockage en surface TFA ou recyclage (2 000 000 m ³)	
Faible		Stockage en surface au Centre de l'Aube (1 300 000 m ³)	Stockage en surface à l'étude (14 000 m ³)
Moyenne		Filières à l'étude dans le cadre de l'article L 542 du Code de l'environnement (ex loi de 1991) pour 55 000 m ³ de MAVL 5 000 m ³ de HAVL et pour 15 000 m ³ de CU	
Élevée			

Le GdR FORPRO (FORmations géologiques PROfondes)

Créé en 1998, ce Groupement de Recherche (GdR) fédère et coordonne l'activité scientifique de plus de 200 chercheurs, enseignants-chercheurs, ingénieurs et étudiants doctorants et post-doctorants répartis dans 25 équipes du CNRS, des universités (Aix-Marseille 3, Bordeaux, Grenoble, Nancy, Nîmes, Paris 6, 7 et 11, Rennes, Strasbourg...), des Instituts de Physique du Globe de Paris et de Strasbourg, et des grandes écoles (Polytechnique, Centrale, École Normale Supérieure...).

Lors de sa création, cinq missions lui ont été confiées :

- 1 - Organiser la réponse de la communauté CNRS, des universités et des grandes écoles, en sciences de l'Univers, sciences physiques de l'ingénieur et sciences chimiques, à l'**axe 2 de la loi de 1991** portant sur un enjeu environnemental majeur pour la société.
- 2 - Mettre en place un partenariat entre le CNRS et l'Andra pour promouvoir une **recherche amont de haut niveau**.
- 3 - Développer des **actions pluridisciplinaires, interdisciplinaires, innovantes**, au sein de la communauté scientifique concernée par les laboratoires souterrains de recherche.
- 4 - Multiplier les échanges des équipes FORPRO avec des équipes étrangères et **participer à des programmes européens**.
- 5 - Favoriser le débat et la **publication scientifique dans ce domaine sensible**.

Ces missions sont remplies ou en voie de l'être ; citons à titre d'exemples :

- Le taux de publication annuel de l'ordre de 15 articles en moyenne dans les revues internationales dépassera **20 en 2004**.
- Des propositions de recherche FORPRO en géophysique en champ proche et en géochimie isotopique ont été retenues en

2003 dans le projet européen « **Near-Field Processes** » du **6^e PCRD**.

- Dans son équipe de Bordeaux, le GdR FORPRO met au point une méthode totalement innovante permettant de **dater les eaux souterraines récentes et anciennes à l'aide de deux isotopes du krypton en hyper-trace dans la nature**, et ce pour quantifier et contraindre les modèles de circulations passées et actuelles de fluides souterrains afin de prévoir le comportement à long terme d'un site de stockage vis-à-vis des fluides susceptibles d'être le vecteur de retour des radionucléides vers la surface et la biosphère.

Le renouvellement du GdR jusqu'en 2007 vient d'être décidé par le CNRS. Ceci va permettre de réaliser le programme d'expérimentations FORPRO dans le laboratoire souterrain de recherche de Meuse/Haute-Marne, situé dans l'Est du Bassin de Paris, à - 470 m de profondeur, au cœur d'une couche argileuse de 125 m d'épaisseur.

La Direction du GdR FORPRO est localisée dans le site GIS (Géochimie Isotopique) du Centre universitaire de Nîmes, Parc scientifique Georges Besse. Grâce, entre autres, à l'appui des collectivités territoriales, l'équipe GIS dispose d'un **équipement ultramoderne de géochimie isotopique** (salle blanche de classe 100, spectromètre de masse TRITON TI) et mène des recherches sur les chemins des eaux souterraines, passées et actuelles, dans l'environnement du laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne, en collaboration étroite avec des équipes d'Aix-Marseille 3, Bordeaux, Nancy, Paris 7 et 11, Rennes et Strasbourg.

Joël Lancelot, directeur du GdR

programme dès 1992. Le premier Groupement de Recherche (GdR) PRACTIS (aujourd'hui PARIS) impliquant la chimie du CNRS et d'autres partenaires a été créé en 1995 ; il a été suivi des GdR GEDEON, NOMADE, FORPRO et MOMAS (voir les deux *encadrés* sur les GdR PARIS et FORPRO, ainsi que celui sur le GdR NOMADE dans l'article de J.-P. Coutures *et al.*, p. 61). Ces GdR sont regroupés dans le programme PACE* du CNRS. Les industriels n'ont soutenu, au début, que les recherches qui pouvaient être communes à leur propre logique économique et aux orientations des recherches sur les axes de la loi : c'est le cas du programme portant sur le conditionnement des déchets de retraitement de La Hague.

Assez récemment, des orientations du nucléaire français de fission ont été avancées par le CEA et EDF pour la première moitié du siècle [7]. Elles s'inscrivent dans l'évolution des idées au plan international sur les filières nucléaires et ont entraîné des infléchissements dans les recherches.

Les enjeux des recherches indiquées dans la loi

La loi indique des orientations de recherche. Les responsables des recherches et les acteurs de la loi ont défini des programmes au regard des enjeux de chaque axe.

L'enjeu de l'axe 1 est de réduire la nocivité à long terme des déchets MAVL et HAVL. Il y a deux voies. La première est de transmuter les radionucléides les plus radiotoxiques qu'ils contiennent (isotopes des actinides mineurs : Np, Am et Cm, produits de fission comme ¹²⁹I et ⁹⁹Tc), ce qui diminuerait l'inventaire de radiotoxicité des déchets qui iraient en stockage géologique et par là même, les quantités de radionucléides susceptibles de revenir à la biosphère dans un temps indéterminé, à partir de colis de déchets ultimes « allégés ». Elle nécessite de séparer les éléments renfermant les radionucléides des CU par un retraitement

poussé allant au-delà du procédé PUREX*. Cette stratégie implique que l'on transmute aussi les isotopes de Pu, actinide séparé avec U lors du retraitement actuel des CU (procédé PUREX), ce qui est partiellement réalisé aujourd'hui avec l'utilisation de 8,5 t de Pu par an dans le combustible MOX issu du retraitement de 850 t de combustible UOX*. La deuxième voie est de chercher des conditionnements spécifiques pour les éléments séparés, plus performants que le conditionnement actuel de l'ensemble des produits de fission et des actinides mineurs, notamment au regard de la lixiviation*. S'il en était ainsi, on retarderait encore plus la migration des radionucléides à vie longue vers la biosphère, à partir de nouveaux colis de déchets mis en stockage. Les recherches concernant l'axe 1 ont porté d'une part sur la séparation des CU des éléments associés aux radionucléides et d'autre part, sur l'examen de scénarios de transmutation et l'étude de systèmes de transmutation (réacteurs ou ADS*).

L'enjeu de l'axe 2 est de montrer la faisabilité scientifique d'un stockage géologique de colis de déchets. Elle est plus ou moins « facile », mais incontournable, selon que l'on transmute ou non les radionucléides à vie longue. La stratégie du stockage géologique est le confinement de la matière radioactive. Cette stratégie est commune à tous les pays nucléaires, qu'ils retraitent ou non leurs CU. Les recherches (géologiques et hydrogéologiques) ont d'abord porté sur la caractérisation, à partir de la surface, de trois sites potentiels (1994-1996), puis se sont focalisées sur un site, celui de Bure, où un laboratoire souterrain est en cours d'implantation pour étudier les caractéristiques de la couche d'argilite et de ses encaissants. Il s'agit des propriétés hydrauliques, mécaniques, géochimiques et de rétention des éléments par la roche saine et perturbée par les creusements. Pour ce site, la réversibilité d'un concept de stockage est aussi étudiée. Elle porte sur les colis de stockage et les installations de dépôt (conception des

dépôts des colis de stockage et gestion de fermeture). L'ensemble des recherches vise à montrer les incertitudes scientifiques de la prévision à long terme, afin d'adapter les concepts d'un stockage pour les maîtriser au mieux et avoir ainsi une assurance raisonnable que les effets radiologiques seront toujours de l'ordre de ceux de la radioactivité naturelle.

L'enjeu de l'axe 3 est la mise en entreposage de colis primaires de déchets pour un temps qui permettrait de se préparer (génération actuelle et générations futures) à toute solution de gestion définitive des colis de déchets et/ou à constituer une réserve stratégique d'uranium et de plutonium pour une utilisation dans les réacteurs du futur en entreposant les CU. La stratégie est ici la « flexibilité ». Les recherches, essentiellement d'ingénierie, ont porté à la fois sur les colis d'entreposage (en relation avec les colis de stockage) et les entrepôts. On a rattaché à cet axe toutes les recherches sur le conditionnement des déchets de retraitement (élaboration de matrices, diminution de volume, caractérisation des colis primaires de déchets).

Acquis des recherches

Les acquis sont présentés selon les axes de la loi. Ils ne sont pas indépendants mais complémentaires. Il existe des structures de coordination entre le CEA et l'Andra sur des sujets transverses aux axes (conteneurs, inventaires, modélisation, matériaux), des accords multipartites et cinq GdR.

Axe 1

A l'occasion de la loi Bataille, la chimie séparative des actinides a bénéficié d'une nouvelle période de recherches, qui ont apporté des résultats très marquants. Ces travaux sont résumés dans l'article de B. Boullis et M. Lecomte (p. 110).

La recherche de nouvelles matrices permettant de conditionner les radionucléides pour servir de modèles ou éventuellement de solutions alternatives aux matrices vitreuses a donné lieu à des études dans le cadre du GdR NOMADE. Les résultats sont présentés dans l'article de J. Carpena et J.-L. Lacout (p. 66) et dans celui de J.-P. Coutures *et al.* (p. 60).

La transmutation nécessite d'introduire les éléments séparés comme Am dans des cibles d'irradiation ou dans des combustibles spéciaux comportant de la matière fissile (essentiellement ^{235}U ou ^{239}Pu). A cet égard, des matériaux (composés ou composites céramiques à base d'oxydes, nitrures, métaux) susceptibles de subir de très fortes irradiations par des neutrons et autres particules, ont été préparés et sont en cours d'irradiations test dans divers réacteurs en France (Phénix jusqu'en 2008) et à l'étranger (réacteur à haut flux de Petten, Pays-Bas).

Plusieurs possibilités de transmutation de divers radionucléides ont été étudiées. Elles montrent que seules les transmutations de Np et Am (voire de Tc) seraient réalistes en association avec l'utilisation de Pu comme matière fissile à « brûler » en priorité en raison de sa radiotoxicité élevée. La faisabilité de la transmutation dans les réacteurs actuels REP* (ou leur version moderne EPR, « European pressurized reactor ») à neutrons thermiques, bien que possible, paraît difficile à mettre en œuvre et vient d'ailleurs d'être abandonnée. Il est de loin préférable d'utiliser des neutrons rapides et à cet égard deux voies existent : l'utilisation de réacteurs RNR* ou de systèmes hybrides ADS* couplant un accélérateur de protons, une cible de spallation* pour produire des neutrons et un assemblage de combustibles sous-critique (UOX et MOX à actinides, en fait à Am). Dans ces conditions, I, Cs et Tc pourraient bénéficier de conditionnements spécifiques. La gestion du Cm reste un problème difficile dans le contexte de la transmutation.

Les recherches liées aux ADS, menées en France et dans le cadre des divers programmes européens Euratom, portent sur les trois sous-ensembles formant un ADS et leur couplage, ainsi que sur les données nucléaires et les matériaux associés. A l'issue du 5^e PCRD Euratom, elles devaient conduire à la conception détaillée d'un démonstrateur européen de 100 MWth. En fait, ce projet est repris dans un projet intégré du 6^e PCRD et il en résulte un étalement de fait du calendrier pour ce démonstrateur. Le projet intégré reprend aussi un programme international de couplage d'un accélérateur de protons et d'un réacteur sous-critique de faible puissance. Les futurs réacteurs à neutrons rapides, par exemple ceux examinés dans le cadre du forum

Le GdR PARIS

(Physico-chimie des Actinides et autres Radioéléments aux Interfaces et en Solution)

Dans le cadre de la loi Bataille de 1991 sur la gestion des déchets nucléaires, le Groupement de Recherche PRACTIS (PROpriétés des ACTinides aux Interfaces et en Solution) a été créé en 1995, à l'initiative du CNRS et du CEA, avec pour objectif la mobilisation de la communauté scientifique concernée par les questions à traiter dans le domaine de la physico-chimie des radioéléments et la chimie des transferts. L'Andra et EDF se sont ensuite associées au GdR. Le GdR PARIS a été créé en 2003 dans la continuité de PRACTIS. Avec d'autres GdR, regroupés dans le programme PACE* du CNRS, il vise à poursuivre les objectifs de la loi Bataille et à apporter des solutions aux problématiques nouvelles liées aux systèmes nucléaires du futur.

Rassemblant quelques 40 laboratoires, le GdR PRACTIS/PARIS a ainsi fédéré une communauté de physico-chimistes et de radiochimistes en focalisant son attention sur les problèmes de traitement, d'entreposage et de stockage des déchets nucléaires. Les recherches communes soutenues par le GdR ont conduit à de nombreuses publications, ainsi qu'à des développements méthodologiques de tout premier plan dans des domaines variés. Dans le domaine de la séparation liquide-liquide, citons :

- le développement de modèles théoriques de simulation moléculaire,

- l'effort de couplage des modélisations moléculaires avec les codes de calcul de génie chimique,
- les progrès des études de spéciation par rayonnement synchrotron,
- la résolution de structures de complexes d'actinides en phase liquide et aux interfaces,
- la mesure directe par microcalorimétrie de grandeurs thermodynamiques associées à l'extraction de sels métalliques par solvant.

Par ailleurs, le GdR PARIS est à l'origine de la renaissance en France de la pyrochimie des actinides.

Plus récemment, sont abordées les études de techniques innovantes de séparation susceptibles d'être appliquées au multirecyclage des combustibles des réacteurs du futur, telles que l'utilisation de liquides ioniques à température ambiante, de fluides supercritiques, de la sonochimie...

Enfin, le GdR PARIS rassemble et anime de nombreuses initiatives dans le domaine des banques de données thermodynamiques relatives aux radioéléments dans les sels fondus, solvants organiques et milieux géologiques.

Pierre Turq, directeur du GdR

international Génération IV, pourraient être déployés à partir de 2035, laissant les réacteurs REP à leur seule fonction électrogène.

Bien que de nombreux résultats expérimentaux aient été acquis à l'échéance de la loi sur la fabrication des cibles et combustibles de transmutation et sur les composants d'un ADS dédié à la transmutation de Am, beaucoup reste à faire pour aboutir à une stratégie de transmutation. Les recherches ne pourraient être conduites qu'en étroite coopération internationale en plusieurs décennies.

Axe 2

Les recherches expérimentales pour cet axe ont été conduites dans trois directions : connaissance la plus détaillée possible des colis primaires de déchets à stocker (y compris l'inventaire prévisionnel de ces futurs colis jusqu'en 2020), connaissance de la géologie et de la géochimie d'un site potentiel de stockage et élaboration de concepts de stockage. La démarche adoptée sous la responsabilité de l'Andra dans ces domaines, ainsi que les principaux résultats, sont explicités dans l'article de F. Jacq (p. 89).

Un important travail d'architecture d'un éventuel stockage dans l'argilite caractérisée à Bure a été fait par l'Andra. Il a permis de définir les colis de stockage des colis primaires de déchets, leur disposition dans des alvéoles tubulaires de stockage (HAVL ou CU) ou dans de grandes chambres (MAVL), ainsi que toute l'infrastructure les desservant. L'emprise d'un stockage pourrait être de quelques km². Il s'agit d'une installation d'une ampleur considérable.

Les études de sûreté d'un stockage géologique appellent le calcul d'impacts radiologiques associés à des scénarios de retour de la radioactivité à l'Homme alors situé dans une biosphère du futur. Ces travaux sont résumés dans les articles de B. Bonin (p. 28), de J. Lafuma (p. 34), ainsi que dans celui de P. Toulhoat *et al.* (p. 41).

Axe 3

En 10 ans, le conditionnement industriel des déchets ultimes de retraitement a fait des progrès incontestables au plan de la réduction des volumes des colis primaires de déchets (réduction d'un tiers des déchets solides et d'un facteur 10 de l'activité des effluents liquides).

Au plan qualitatif, les connaissances sur la tenue des matrices de confinement des radionucléides et des contenants à diverses agressions ont grandement progressé (voir l'article de S. Gin et I. Ribet, p. 72). Pour les combustibles usés, les recherches ont aussi conduit à mieux comprendre leur comportement en stockage (voir les deux articles de J.-M. Gras *et al.*, p. 18 et p. 78).

L'entreposage des colis de déchets est une opération industriellement maîtrisée, qui peut être envisagée sur une période d'une centaine d'années renouvelable. Il ressort des recherches de l'axe 3 qu'un entreposage de longue durée de surface ou de sub-surface ne peut pas être dans sa conception et dans sa gestion une simple reconduction de la pratique d'entreposage existante. La limite de son exploitation courante semble limitée par la garantie que l'on peut apporter pour la tenue du génie civil. Aussi devrait-on également envisager son renouvellement pour couvrir plusieurs siècles. Une surveillance active de l'entreposage est nécessaire avec une maintenance lourde à échéance du siècle.

Recherches à l'étranger

Pour l'instant, aucun pays n'a ouvert de stockage géologique pour les déchets MAVL et HAVL de l'électronucléaire, bien que plusieurs soient assez avancés dans le processus devant y conduire. Tous les déchets à vie longue de par le monde sont en entreposage. Le seul stockage géologique en exploitation aux États-Unis (WIPP, Carlsbad, NM) est un stockage pour les déchets militaires type MAVL. Cependant, les recherches sur ces sujets sont actives et font l'objet de très nombreuses collaborations internationales et de nombreux programmes de recherche internationaux.

Conclusion

Les recherches conduites sur les axes 1 et 2 de la loi ne sont pas complètes au sens qu'elles ne permettront pas de décider en 2006 de lancer la transmutation ni de construire un stockage à Bure. La loi avait certainement sous-estimé l'ampleur du programme qu'elle lançait. Toutefois, les résultats partiels acquis sont solides et suffisants pour poursuivre, en les focalisant, les recherches. La transmutation n'est pas inaccessible, mais elle nécessite d'engager des moyens importants sur plusieurs décennies, tant au niveau du retraitement des CU que des systèmes de transmutation. Un stockage géologique réversible dans la Callovo-Oxfordien offrirait de nombreuses garanties, mais il faut au préalable continuer les expériences entreprises dans le laboratoire souterrain de Bure et reconnaître un secteur de la couche d'argilite sur une extension compatible avec l'emprise d'un stockage. Cette emprise est fonction des déchets que l'on souhaite stocker et du temps préalable d'entreposage pour les déchets HAVL que l'on peut assumer. Alors les colis de déchets ultimes pourraient aller au stockage dans les meilleurs délais, délais qui seraient assez rapides pour les déchets MAVL et beaucoup plus longs pour les déchets thermiques HAVL. Les recherches conduites dans l'axe 3 montrent qu'un entreposage de longue durée est possible, mais qu'il ne peut être passif.

Références

- [1] *Sûreté nucléaire et radioprotection en France en 2003*, Direction générale de la sûreté nucléaire et de la radioprotection (DGSNR), 6 place du Colonel Bourgoin, 75012 Paris, **2003**.
- [2] Guillaumont R., *Gestion et perspective de gestion des déchets radioactifs*, Technique de l'Ingénieur, **2002** (BN 3660) et **2003** (BN 3661).
- [3] *Gestion des échelles de temps dans l'évaluation de la sûreté en phase de post fermeture*, OCDE-AEN, n° 5148, Édition de l'OCDE, rue André Pascal, 75775 Paris Cedex 16, **2004**.
- [4] La plupart des recherches fondamentales concernant la gestion des déchets nucléaires sont présentées dans les Congrès internationaux périodiques Global, Migration, Atalante et les congrès Andra : Global 2003, New Orleans, LA, 16-20 novembre 2003 ; Migration 2003, Geongju, Korea, 22-26 septembre 2003 ; Atalante 2004, Nîmes, 21-24 juin 2004 ; Andra international meeting, Reims, 9-13 décembre 2004.
- [5] Rapports des Commissions Castaing (novembre 1982, mars 1983, octobre 1984) et de la Commission Goguel (mai 1987).
- [6] Rapports annuels de 1 à 10, Commission nationale d'évaluation, 39-43 quai André Citroën, 75015 Paris, **1994-2003**.
- [7] Tinturier B., Debes M., EDF's views and commitments concerning energy sustainability and nuclear energy, *Proceeding*, Global 2003, New Orleans, LA, 16-20 novembre **2003**, p. 513-520.
- [8] Le Bars Y., *Pour un inventaire national de référence des déchets radioactifs*, La Documentation française, Paris, **2000**.



Robert Guillaumont*

est membre de la Commission nationale d'évaluation et de l'Académie des sciences.

* 7 rue Édouard Branly, 91120 Palaiseau.
Tél. : 01 60 14 51 73.
Courriel : robert.guillaumont@wanadoo.fr