

AVANCEMENT DES TRAVAUX FRANÇAIS SUR L'AVAL DU CYCLE NU- CLEAIRE : LE STOCKAGE SOUTERRAIN DES DECHETS

Le stockage des déchets nucléaires est un des enjeux majeurs de la filière nucléaire, seule alternative actuelle pour la production d'énergie, aux énergies fossiles, génératrices de réchauffement climatique, et aux énergies renouvelables, au potentiel encore trop limité.

Le Club Mines-Energie a donc invité le 14 juin 2005 **Ghislain de Marsily**, professeur à l'Université Paris VI et membre de la Commission Nationale d'Evaluation (CNE) instituée par la loi dite "Bataille" du 30 décembre 1991 relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs (loi reprise par l'article L.542 du Code de l'Environnement), à une conférence-débat dans les locaux de l'Ecole des Mines de Paris.

Le lecteur intéressé pourra également se reporter à deux articles parus dans le dossier Energie du numéro de mars/avril 2003 de la Revue des Ingénieurs : "*La gestion des déchets radioactifs en France*" par François Jacq (CM 89), Directeur Général de l'ANDRA jusqu'au 1/7/2005, et "*L'aval du cycle nucléaire et le jeu des acteurs (La loi de 1991)*" par Pierre Audigier (CM 57). Ces deux articles sont consultables dans la rubrique « Dossiers » du site du Club www.mines-energie.org. Les principaux transparents projetés lors de la conférence-débat du 14 juin sont également disponibles sur ce site.

Après avoir rappelé quels étaient les déchets produits par le cycle nucléaire et présenté un historique des recherches, la loi de 1991 et le rôle de la CNE, Ghislain de Marsily a décrit les travaux en cours sur le site de Bure.

Les déchets produits par le cycle nucléaire sont, en amont des réacteurs nucléaires, d'une part, les résidus de la purification du minerai uranifère et, d'autre part, l'uranium appauvri restitué à l'issue de la phase d'enrichissement. Le stockage de ces matériaux, dont la radioactivité (Radon, Thorium, Uranium 235) est comparable à celle du minerai uranifère, se fait ou se fera notamment dans des sites miniers. En ce qui concerne les déchets produits en aval des réacteurs nucléaires, ils sont répertoriés comme suit :

	Déchets à période courte (Période < 30 ans)	Déchets à période longue (Période > 30 ans)
Déchets TFA (Très faible activité)	Ces déchets sont essentiellement produits lors du démantèlement d'un réacteur. Ils sont stockés depuis 2003 sur le site de Morvilliers (Aube). Leur volume total serait de l'ordre du million de m ³ .	
Déchets FA (Faible activité)	Ces déchets (aussi appelés déchets A) proviennent des matériels utilisés pour l'exploitation (résines, gants, filtres, ...).	Des stockages dédiés en subsurface sont à l'étude pour ces déchets.
Déchets MA (Moyenne activité)	Leur volume total (FA et MA) devrait être de l'ordre de 1,7 million de m ³ . Ils ont été stockés jusqu'en 1992 sur le site de la Hague et depuis sur le site de Soulaines (Aube).	Ces déchets (aussi appelés déchets B) proviennent principalement des résidus du retraitement. Leur volume total serait de l'ordre de 80 000 m ³ .
Déchets HA (Haute activité)	Ces déchets (aussi appelés déchets C) sont constitués des résidus de produits de fission retraités, d'actinides, de verres et de combustibles non retraités. Leur volume total serait de l'ordre de 6 000 m ³ .	

Les recherches sur les déchets B et C sont l'objet de la loi du 31 décembre 1991, la difficulté n'étant pas le volume mais la période des radio-éléments, plusieurs millions d'années pour certains.

Les volumes indiqués ci-dessus sont des ordres de grandeur de la quantité totale de déchets produits jusqu'en 2020 avec le parc électronucléaire actuel fonctionnant 40 ans, y compris son démantèlement. Ils correspondent aux déchets émis par l'ensemble des opérateurs français (EDF, COGEMA, hôpitaux, ...) et supposent qu'il y a retraitement de 850 tonnes par an de combustibles usés sur 1 100 ton-

nes produits, afin de produire du plutonium et de l'uranium utilisés dans les combustibles MOX ; l'option du retraitement n'est pas généralisable à tous les pays car elle facilite l'accès à l'arme nucléaire.

Dès les années 1950, l'Académie des Sciences des Etats-Unis s'intéresse au stockage géologique et des mines de sel du Kansas sont étudiées. D'autres propositions sont avancées : envoi dans l'espace (fusées, canon... mais quid en cas d'échec du tir), enfouissement dans les glaciers de l'Antarctique grâce à la chaleur produite par les déchets, enfouissement dans des zones océaniques de subduction (plaque tectonique plongeante), entreposage dans des déserts, transmutation, ... sans que des solutions s'imposent.

Dans les années 1960, un forage de reconnaissance est effectué par le CEA sous l'usine de La Hague et des contacts sont pris avec des exploitants de mines de potasse (MDPA).

En 1973, le Ministère de l'Environnement se préoccupe du problème (Groupe Bertrand Giraud, rapport Gruson) avec les deux options entreposage et stockage.

Les années 1970 voient le lancement d'un programme de recherche européen et une carte des formations potentielles en Europe est préparée par le BRGM. Les travaux sont répartis par Bruxelles comme suit :

- France et Angleterre : stockage dans le granite,
- Belgique et Italie : stockage dans des argiles,
- Allemagne et Hollande : stockage dans le sel.

Parallèlement, le programme international "**Seabed**" est initié avec la participation de la France : les déchets seraient placés dans des torpilles descendant verticalement à grande vitesse pour s'enfoncer de plusieurs dizaines de mètres dans les sédiments marins meubles des océans, sous plusieurs milliers de mètres de colonne d'eau. Une option par forage a aussi été examinée. Plusieurs participants ont regretté lors du débat que cette solution, techniquement ingénieuse et probablement sans risque, ait été rejetée vers 1985 par décision de la Convention de Londres sur le Droit de la Mer, les "petits" pays ne voulant pas que quelques pays riches s'octroient le droit de "polluer" les océans. L'immersion des déchets A en mer, que la France et surtout l'Angleterre ont pratiquée, a été également prohibée. Il n'en reste pas moins que cette solution d'enfouissement dans les fonds sous-marins pourrait être la meilleure si le nucléaire se développait fortement !

A la fin des années 1970 et dans les années 1980, les recherches de stockage dans des formations géologiques hôtes sont accélérées. Le rôle de la formation hôte est de :

- protéger des « accidents » de la surface,
- assurer un environnement stable et favorable à l'intégrité des barrières ouvragées sur des durées très longues,
- après dégradation des barrières ouvragées, ralentir la migration des radionucléides dans l'environnement grâce à :
 - une faible vitesse d'écoulement,
 - une grande porosité d'eau immobile,
 - une capacité d'adsorption et d'insolubilisation,
- diluer et retarder les radionucléides avant retour à la biosphère.

Lors du débat qui a suivi l'exposé, en réponse à un intervenant qui indiquait qu'il n'y avait pas lieu d'être inquiet en raison des très nombreuses barrières de protection successives depuis les verres qui entourent les produits radioactifs et qui ont une durée de vie très longue, Ghislain de Marsily a souligné que même si au bout d'un temps géologique les "matrices" en verre contenant les produits radioactifs pouvaient laisser se dissoudre certains éléments et qu'aucune couche géologique n'était totalement imperméable, les vitesses de diffusion des produits radioactifs étaient tellement lentes qu'il n'y avait pas de risque de les voir réapparaître en surface en quantité significative avant que leur radioactivité n'ait fortement décru (l'iode met de l'ordre 100 000 ans pour traverser 50 mètres d'argile par diffusion moléculaire).

Des recherches sur des sites granitiques en Bretagne et dans le Massif Central ne débouchent pas à la fin des années 1970. Suite aux travaux de la Commission Castaing et du rapport Goguel, le CEA lance dans les années 1980 un programme sur 4 types de roches : sels de Bresse, argiles du Toarcien près de Laon, Ardoises en Vendée près d'Angers, granite en Bretagne. Suite à des fortes oppositions en Ven-

dée et en Bresse, un moratoire est décidé par le Gouvernement Rocard en 1988 et une mission confiée à Christian Bataille, député du Nord, afin d'éclairer les pouvoirs publics.

Au début des années 1990, cette mission aboutit au vote de la loi du 31 décembre 1991 sur les déchets nucléaires qui :

- fixe trois axes de recherches :
 - axe 1 : recherches sur la séparation poussée et la transmutation (CEA),
 - axe 2 : recherches sur le stockage géologique, réversible ou non, avec la construction de laboratoires souterrains pour ausculter les roches (ANDRA),
 - axe 3 : recherches sur le conditionnement et l'entreposage de longue durée (300 ans ou plus...) (CEA),
- fixe une période de 15 ans pour ces recherches (1992 à 2006),
- crée l'ANDRA, EPIC sous la tutelle de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement,
- crée la Commission Nationale d'Evaluation (CNE) chargée du suivi des recherches sur la gestion des déchets radioactifs.

La CNE rédige chaque année un rapport sur l'avancement des recherches, remis au Gouvernement et au Parlement, et prépare pour 2006 un rapport global sur les recherches et leurs conclusions, afin de contribuer à l'élaboration du nouveau projet de loi à examiner en 2006. La CNE fonctionne par des auditions des «acteurs de la loi de 1991» (ANDRA, CEA, COGEMA, EDF, ...); environ 120 auditions et 100 réunions de travail ont eu lieu en 11 ans. Elle visite des installations de recherche françaises dans les trois axes de la loi, effectue des visites similaires en Allemagne, Suède, Finlande, USA, Canada, Hollande, Espagne.

La CNE participe à un rendez-vous annuel avec les Comités Locaux d'Information et de Suivi (CLIS) des sites où intervient l'ANDRA : lors du débat, Ghislain de Marsily a souligné des difficultés lors de la dernière réunion avec le CLIS de Bure en 2004, l'incompréhension ayant été totale entre les scientifiques de la CNE et certaines associations du CLIS. De nombreux projets sont arrêtés dans le monde par suite des oppositions locales.

A la suite d'une mission de recherche de sites potentiels confiée au Député Bataille par le Gouvernement et en concertation avec les Assemblées Territoriales, quatre départements sont retenus (Gard, Vienne, Meuse, Haute Marne) avec décision en 1994 de concentrer les travaux sur trois zones :

- argile du Callovo-Oxfordien (site de Bure aux confins Meuse / Haute Marne),
- granite sous recouvrement sédimentaire (seuil du Poitou dans la Vienne),
- silts argileux (Marcoule dans le Gard).

Aujourd'hui, un premier bilan des travaux peut être établi :

- **Axe 1**: la séparation des actinides mineurs n'est actuellement faisable qu'au niveau d'un laboratoire avec des molécules extractantes en phase liquide ; par contre la faisabilité scientifique de la transmutation n'en est qu'à une étape préliminaire, les retards provenant entre autres de l'arrêt de SuperPhénix et de celui prévu de Phénix en 2008. Deux voies possibles : les réacteurs à neutrons rapides (vers 2040 ?) et les réacteurs rapides sous-critiques dédiés, couplés à un accélérateur (un projet Européen est en cours).
- **Axe 2** : les travaux sur les trois sites retenus ont progressé normalement jusqu'en 1998 : géophysique, forages depuis la surface, dépôt des demandes d'Installation des Laboratoires. La CNE a émis un avis négatif sur le granite de la Vienne et le dossier Gard a été retiré sous la pression des vigneron. Le Gouvernement a retenu Bure aux confins Meuse / Haute Marne (MHM) et a demandé à l'ANDRA de proposer un nouveau site granitique. Après une sélection de massifs potentiellement intéressants, une "Mission Granite" confiée à trois hauts fonctionnaires n'a pas réussi à obtenir de consensus sur un site. Le Gouvernement a donc chargé l'ANDRA d'étudier les granites en collaboration avec des pays étrangers et de regarder la transposabilité des résultats aux granites Français.
- **Axe 3** : le conditionnement et l'entreposage de longue durée est industriellement réalisable sur 100 ans et la faisabilité sur 300 ans est bien dégrossie avec un choix de conteneurs compatibles avec un transfert ultérieur en site de stockage et des concepts en surface (casemates) et en sous-surface (flanc de colline). La reconstruction périodique de l'entrepôt tous les 300 ans jusqu'à l'infini est possible mais pose des problèmes sociétaux (N.D.L.R. : Louis XIV est mort il y a moins de 300 ans ...). A la question sur la sécurité d'un site d'entreposage face à une attaque terroriste du

style du 11 septembre 2001, Ghislain de Marsily a précisé que l'entreposage pouvait se faire dans des casemates enterrées, assurant une protection certaine. Par ailleurs, l'entreposage de très longue durée (de l'ordre de 3 000 ans par exemple) est soumis à des incertitudes fortes de nature sociétale et technique (N.D.L.R. : il y a 3 000 ans « nos ancêtres les Gaulois » arrivaient en Gaule !).

La discussion a montré qu'il n'y avait pas nécessairement de discontinuité entre entreposage et stockage, le stockage réversible, auquel Ghislain de Marsily ne voit que des avantages, étant intermédiaire entre entreposage de longue durée et stockage irréversible.

Les recherches sur le site de Bure ont donné lieu à de nombreux travaux :

- interprétations des données des 68 forages pétroliers existants, et de 1 300 km de profils sismiques 2D existants ;
- réalisation et interprétation de trois profils sismiques 2D de haute résolution supplémentaires (d'une longueur de 15 km) ;
- réalisation et interprétation d'une campagne sismique 3D sur une surface de 4 km² ; l'interprétation de ces données permet de bâtir une image tridimensionnelle du sous-sol, à la manière d'une tomographie médicale par scanner ;
- réalisation de 27 forages dans le secteur, sur une longueur totale forée de 5 km, et où 4,2 km de carottes de roche ont été récupérées, dont 2,3 km dans le Callovo-Oxfordien. 23 de ces forages sont verticaux et 5 sont déviés, ce qui a permis une meilleure reconnaissance de la formation selon la direction horizontale et de rechercher la présence éventuelle de fractures d'orientation verticale, dont la présence était parfois soupçonnée, et que des forages verticaux ne pouvaient pas recouper ; en revanche, les forages horizontaux et déviés, bien orientés, ne pouvaient les manquer ;
- prélèvement de 22 700 échantillons de roches, dont 5 300 échantillons ont été analysés en laboratoire ;
- prélèvement et analyse de 7.300 échantillons d'eaux de la plupart des forages réalisés, à différents niveaux sur la verticale, pour reconnaître les fluides présents dans les différentes formations géologiques situées au-dessus de la couche cible, au sein de celle-ci, et en dessous ; des mesures locales de la perméabilité des niveaux rencontrés ont également été effectuées *in situ*, par injection ou pompage d'eau, sur environ 50 chambres de mesure ;
- fonçage de deux puits d'accès à la couche, pour pouvoir y construire le laboratoire souterrain ; le puits dit auxiliaire, est arrivé à sa profondeur nominale, 490 m, en octobre 2004 ; dans le puits dit principal, une galerie expérimentale est opérationnelle depuis novembre 2004 à la profondeur de 445 m. Le puits est actuellement (début juin 2005) à la profondeur de 470 m environ, et devrait arriver à sa base, à 490 m, en octobre 2005 après la réalisation des expérimentations qui y sont prévues ;
- levés géologiques détaillés tout au long du fonçage de ces puits, par une équipe de géologues, après chaque volée, pour reconnaître dans le détail les formations traversées, les photographier, échantillonner les roches et les fluides, observer les éventuelles fractures ou anomalies qui pourraient se présenter ; mesure en continu des débits d'eau parvenant aux puits pendant leur fonçage issus des formations géologiques traversées ;
- creusement d'une galerie horizontale expérimentale en T, appelée "la niche", à partir du puits principal, à la profondeur de 445 m, (partie supérieure du Callovo-Oxfordien ; cette galerie, d'une longueur cumulée de 35 m, a permis de voir sur une grande surface la roche, d'observer son comportement mécanique, et d'y mettre en place des expériences ; elle a en effet été équipée de 40 forages horizontaux, verticaux ou déviés, d'une longueur de 10 à 15 m chacun, pour y installer des instruments de mesure et d'expérimentation ;
- début des expériences mises en œuvre dans cette niche fin janvier 2005, visant à : (i) reconnaître le comportement mécanique de la roche dans le temps, en particulier lors de la prolongation du fonçage du puits principal ; (ii) recueillir des fluides au sein de la roche cible (en cours) ; (iii) lancer une expérience de migration de solutés par diffusion au sein de la roche cible (en cours), qui permettra d'estimer *in situ* les coefficients de diffusion de divers solutés ainsi que certains coefficients de rétention par la roche ;
- lancement en mars 2005 d'une seconde expérience de migration de solutés par diffusion dans la roche *in situ*, à partir d'un forage fait depuis la surface ; cette opération techniquement très diffi-

cile, est une "première mondiale" qui doit être saluée et dont les résultats seront très importants pour conforter ceux obtenus à partir de la "niche" ou de la galerie du fond ;

- creusement d'autres galeries expérimentales à la profondeur de 490 m à partir du puits auxiliaire, c'est-à-dire à peu près au milieu de la couche cible, ce creusement, actuellement en cours, devrait être achevé au plus tard en décembre 2005, il permettra de poursuivre l'observation directe de la roche, sur une longueur de galerie cumulée de 200 m ; de plus, les expériences supplémentaires suivantes y seront mises en place : (i) caractérisation et tentative d'interruption de la zone endommagée de la roche entourant la galerie, du fait de l'excavation ; cette zone, appelée communément l'EDZ (Excavation Disturbed Zone, en Anglais), joue un rôle fondamental dans le comportement d'un éventuel stockage en formation géologique (possibilités éventuelles de circulations préférentielles); (ii) poursuite de la caractérisation mécanique à long terme de la roche cible ; (iii) mesures in situ de la conductivité thermique de la roche ; (iv) échantillonnage des eaux interstitielles de la roche, mesures de la perméabilité ; (v) nouvelles expériences de diffusion *in situ*.

Ghislain de Marsily a ensuite décrit les concepts généraux d'un stockage. Par exemple, les architectures souterraines sont ainsi conçues :

- architecture horizontale et positionnement au milieu de la formation,
- fractionnement du stockage,
 - séparation des zones de stockage des différents déchets (B, C, Combustibles Usés CU) afin de limiter les interactions (environ 250 mètres entre chaque zone),
 - organisation en modules indépendants (distance de garde de l'ordre de 50 mètres) afin de permettre une progressivité de la construction, une flexibilité de la gestion du stockage,
- architecture borgne aux différentes échelles (zones, modules, alvéoles) et regroupement des accès.

Les ouvrages de liaison jour/fond sont caractérisés par :

- quatre types de puits pour quatre fonctions distinctes:
 - puits de descente des colis (cage de capacité 110 tonnes) ;
 - puits de descente du personnel, pouvant aussi assurer le transport de petit matériel - puits d'entrée d'air ;
 - puits de service - cage capacité de 40 t (déblais, gros équipements, matériaux) avec fonction de puits de secours pour le personnel et l'entrée de l'air ;
 - puits de ventilation pour le retour d'air, avec flux séparés (zones à activités minières et désenfumage en cas de situation accidentelle, zones nucléarisées avec filtration).
- les diamètres utiles des puits sont d'environ 6 à 12 mètres, correspondant à des diamètres classiques d'installations minières.
- l'équipement des puits est de type cage, contrepoids et poulie à friction «Koepe » largement éprouvé dans le monde minier et ayant démontré sa fiabilité.

Des descenderies sont étudiées en variante :

- une descenderie présente l'avantage d'une plus grande souplesse d'utilisation car elle ne nécessite pas de rupture de charge et elle est techniquement moins contraignante ;
- toutefois les flux qu'il est possible de transporter sont généralement plus faibles (durée de descente/remontée supérieure et capacité plus faible) ;
- la possibilité d'ouvrir une descenderie est donc à apprécier au regard des caractéristiques du site : terrains de recouvrements peu aquifères et de bonnes propriétés mécaniques, profondeur de 500 mètres plutôt élevée mais pas sans précédents.

Plusieurs types d'alvéoles sont à prévoir au fond :

- **Alvéoles de déchets B** : tunnels horizontaux de 250 mètres de long et de diamètre 10 à 11 mètres. Les colis de stockage sont empilés sur plusieurs niveaux ;
- **Alvéoles de déchets C** : tunnels horizontaux sans barrière ouvragée (diamètre excavé de 0,70 mètre) de longueur environ 40 mètres ; variante avec barrière ouvragée ;
- **Alvéole de combustibles usés (CU)** : tunnels horizontaux avec barrière ouvragée (diamètre excavé d'environ 3 mètres) de longueur environ 40 mètres.

La question de l'évaluation des risques et de leur acceptabilité a été évoquée lors du débat : un intervenant ayant dit qu'il faudrait estimer les risques car, sinon, il y aurait inquiétude des populations, Ghislain de Marsily a indiqué que l'ANDRA avait conduit, pour le dossier 2005, une analyse préliminaire des risques, mais que la production d'une véritable analyse des risques, lors de la demande de l'autorisation de construction et d'exploitation d'un éventuel stockage, demandera des connaissances bien plus détaillées sur les propriétés du site, et sur les scénarios à prendre en compte pour ces analyses. L'ANDRA poursuit actuellement des travaux dans ce sens. Rendre ces études accessibles en compréhensibles au public demande un exercice de pédagogie difficile, et l'établissement d'un véritable dialogue.

La Commission Nationale du Débat Public a été saisie du sujet et devrait organiser des débats à Barle-Duc et St Dizier, Caen, Paris et Aix-en-Provence.

Les coûts du stockage des déchets B et C ont été évalués par la Cour des Comptes en 2003 comme suit :

- scénario S1a : retraitement de tous les combustibles usés, 16 à 24 milliards d'euros,
- scénario S1b : retraitement des UOX et stockage des MOX, 25 à 41 milliards d'euros,
- scénario S2 : arrêt du retraitement en 2010 et stockage de tous les combustibles usés après cette date, 35 à 58 milliards d'euros.

En vertu du principe français pollueur – payeur, les coûts du traitement des déchets sont provisionnés par EDF, seul exploitant nucléaire en France pour le moment, au niveau de 0,14 c€/kWh produit, en plus des provisions établies pour le démantèlement.

Enfin, dernier sujet débattu, **dans quel sens pourrait aller le projet de loi qui sera discuté en 2006 ?**

Ghislain de Marsily a noté que par rapport au contenu de la loi de 1991, un seul site avait été étudié, et non trois comme prévu. Un consensus s'est dégagé entre l'orateur et l'assistance pour constater que d'autres recherches devraient très probablement être menées, ne serait-ce que pour terminer l'évaluation du site expérimental de Bure puis reconnaître et caractériser, si cette zone apparaît favorable, la surface réelle qui serait nécessaire à la construction d'un stockage, et pour étudier si possible un autre laboratoire dans un autre site, ce qui prendra au moins une quinzaine d'années. Par ailleurs, il subsiste des incertitudes fortes sur les axes 1 et 3.

Compte rendu établi par Christian Maillard (N63) et Eric Peltier (P85)