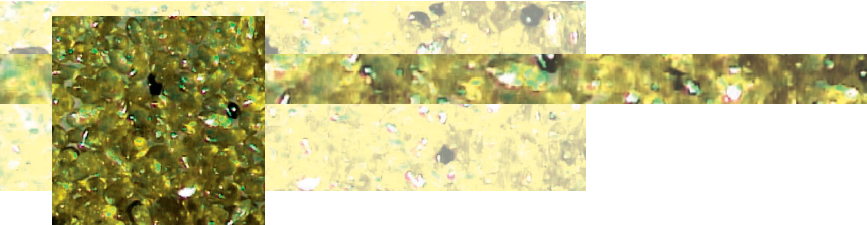




Conclusions et perspectives



En demandant au CNRS et aux équipes universitaires d'aborder les problèmes liés à la gestion des déchets radioactifs, on a fait appel à ses compétences scientifiques en physique nucléaire, en physico-chimie, en science des matériaux, en modélisation mathématique et en géosciences. Pourtant, de nombreux domaines de l'énergie nucléaire, du stockage et de l'entreposage de ses déchets, étaient mal connus du CNRS lorsque la loi de 1991 a été promulguée. Le CNRS aurait pu limiter le champ de ses interventions à quelques questions bien circonscrites, auxquelles il aurait appliqué ses méthodes en faisant appel à ses spécialistes et à ses moyens expérimentaux et se borner à une situation de sous-traitance. Il est donc heureux que ses chercheurs ne se soient pas contentés de fournir l'aide qu'on attendait d'eux sur quelques sujets, mais qu'ils se soient passionnés pour tous leurs aspects, se soient formés dans plusieurs branches de l'énergie nucléaire et se soient engagés avec rigueur scientifique et imagination.

Pour les déchets radioactifs déjà conditionnés, la solution du centre souterrain de stockage, aussi sûre que les moyens techniques d'évaluation, de génie civil et de confinement le permettent aujourd'hui, se présente immédiatement à l'esprit. Mais réduire le volume et la toxicité des déchets à venir est aussi un projet légitime. Le CNRS s'est engagé sur les axes 1 et 2 sans écarter *a priori* aucun thème de travail. Les recherches sur ces deux axes ont soulevé des défis scientifiques du même niveau et suscité le même engagement de la part des chercheurs. Il est juste de dire que la structure des GDR, en particulier la concertation avec les partenaires, a permis des clarifications, des discussions, et aidé à fixer le cap dans chaque domaine. Cette concertation est maintenue pour fixer les perspectives des travaux au-delà de 2006.

En s'attachant à une approche globale des systèmes, les équipes du CNRS, en liaison avec celles du CEA, ont contribué à expliciter les problèmes liés à la transmutation et aux réacteurs du futur.

Pour les systèmes hybrides dédiés à la transmutation (ADS), les travaux les plus difficiles sur l'accélérateur portent maintenant sur sa fiabilité. Les techniques novatrices de mesure et de contrôle de la réactivité du massif sous-critique, acquises avec l'expérience Muse, devront trouver une validation plus générale auprès de dispositifs de puissance qui s'avèreront disponibles, avant la construction d'un démonstrateur de réacteur hybride. On compte sur les résultats de l'expérience

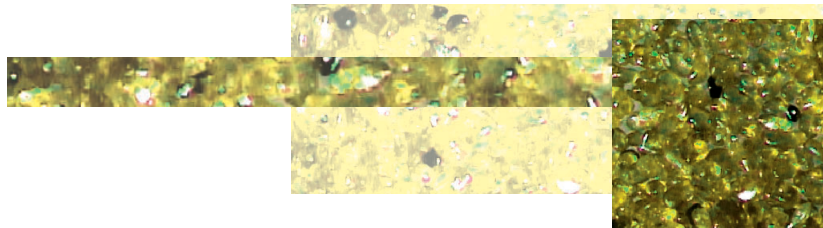
Megapie pour décider du dispositif de spallation, en particulier de la présence ou non d'une fenêtre qui reste un défi en termes de réalisation, de tenue aux radiations et de résistance des matériaux à la corrosion par les métaux liquides. Enfin, les calculs évaluant les potentiels d'incinération des ADS et les comparant à ceux des réacteurs rapides du futur seront complétés par des simulations basées sur des codes stochastiques. Ce sont sur ces travaux que se fondera l'évaluation technico-économique du projet intégré européen Eurotrans.

Quelques données nucléaires précises et fiables restent à acquérir, soit parce que le bilan neutronique tendu des réacteurs envisagés exige d'améliorer leur précision, soit parce que de nouveaux matériaux sont envisagés pour améliorer leur rendement énergétique. Les chercheurs devront obtenir l'évaluation des données qu'ils ont acquises, sans doute en y participant, pour qu'elles puissent être intégrées dans les banques de données.

Les travaux sur les réacteurs du futur devraient être encouragés et coordonnés dans les domaines suivants : physique des réacteurs, systèmes et scénarios et surtout recherche de nouveaux matériaux aptes à résister simultanément à de hautes températures, à une très forte irradiation et à la corrosion due aux caloporteurs. Les travaux devraient se focaliser aussi sur la définition d'une filière régénératrice au thorium, ayant les meilleures caractéristiques de sûreté et de retraitement du sel. Les potentialités de la filière REP et de filières à neutrons rapides devraient être évaluées en vue du démarrage d'une filière reposant sur la fission de l'uranium 233. Tous ces thèmes se présentent comme de nouvelles opportunités de collaboration avec le CEA et les partenaires industriels.

La communauté des radiochimistes, dispersée avant 1995, s'est agrandie et dynamisée avec l'arrivée de nombreux physico-chimistes et d'environnementalistes. Ce renouvellement fournit la clé de son adaptabilité aux nouveaux enjeux, dans le cadre des actions et des projets industriels des organismes partenaires.

Récemment, une partie des travaux a été orientée vers les problèmes physico-chimiques de l'axe 2. Des études de sorption, menées dans un cadre large, s'associent à une modélisation physico-chimique microscopique pour extrapoler des grandeurs obtenues sur les suspensions d'argile aux argiles les plus compactes. Plus généralement, la sorption sur des milieux naturels est un thème dans lequel la transition du fondamental



à l'appliqué est particulièrement féconde : les extrapolations du microscopique au macroscopique, de l'instantané à des échelles de temps multiséculaires, sont des défis auxquels les équipes du CNRS sont partout confrontées.

Les études sur la pyrochimie et les milieux ioniques extrêmes constituent aussi un enjeu de recherche fondamentale et appliquée. Les études sur l'effet des rayonnements, tant sur les molécules et les processus d'extraction (pour l'axe 1) que sur les matériaux en condition de stockage (pour l'axe 2), ont renforcé le thème de la radiolyse. Choisir d'une manière rationnelle les procédés et solutions possibles impose de mettre l'accent sur les paramètres quantifiables, mesurables ou modélisables. Les modélisations trouvent ainsi une place centrale auprès des mesures, pour l'optimisation des procédés de séparation et la quantification des prédictions pour le stockage et l'entreposage. Elles se trouvent au cœur des développements actuels.

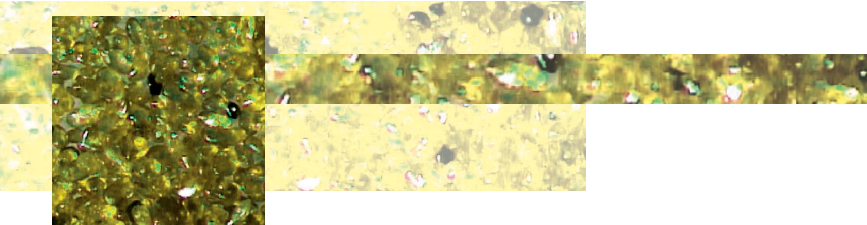
La création de l'Institut de Chimie Séparative de Marcoule, appuyé sur une unité mixte de recherche CEA/CNRS/Université, devrait faciliter l'accès à des expérimentations en milieu hautement radioactif et permettre de transposer à la radiochimie l'approche « grands instruments » qui est déjà celle des utilisateurs de sources de neutrons et de rayonnement synchrotron. On attend qu'ainsi la culture de la radiochimie diffuse vers la physico-chimie moderne, devenant partie intégrante de la démarche des spécialistes du nucléaire. Le CNRS peut et souhaite y participer.

Les chercheurs ont également eu à rechercher et tester de nouveaux matériaux, tant pour le conditionnement spécifique que pour les cibles de transmutation. Face à des problèmes complexes incluant des études en milieux radioactifs, des moyens de caractérisation ont fait défaut. Ainsi, pour le cas spécifique des actinides mineurs, les études de matrices de confinement n'ont pas toutes atteint le même degré de maturité. La communauté souhaite les conduire à terme, en instruisant notamment : (a) le comportement de l'hélium généré en conditions d'auto-irradiation, (b) le comportement à long terme du colis dans les conditions de stockage, (c) l'industrialisation de la fabrication de ces céramiques de conditionnement. Ce dernier point devra être abordé avec les industriels céramistes, afin de déboucher sur des procédés réalistes, dont les coûts et performances constitueront des éléments de la comparaison de cette solution alternative à la voie de transmutation.

Sans préjuger des souhaits du législateur, une réflexion est entamée, afin d'entretenir la dynamique CEA/CNRS mise en place dans le cadre des matrices performantes pour actinides mineurs et assurer la conduite à terme des travaux. Bien que très pluridisciplinaire, la communauté, majoritairement composée de chimistes du solide, souhaite à l'avenir prendre en compte de façon plus approfondie les problématiques concernant les matériaux du combustible et de son proche environnement dans les futurs réacteurs à caloporteur gaz et interagir étroitement avec les équipes CEA œuvrant sur les cibles de transmutation.

En ce qui concerne les travaux associés au stockage en formation géologique profonde, le CNRS a su établir avec l'Andra un partenariat extrêmement fort, qui dépasse d'ailleurs le cadre du programme Pace. L'ouverture du laboratoire souterrain constitue un moment-clé de ces travaux et les équipes du CNRS se sont regroupées pour concentrer leurs efforts sur une proposition de programme de recherche, consacrée à l'évolution de la zone endommagée après le creusement des puits et des galeries. Après avoir caractérisé l'endommagement mécanique et chimique qui en a résulté, il sera essentiel d'aborder la cicatrisation de cette zone, pour laquelle des moyens expérimentaux et des techniques ont été conçus et testés. Les conditions expérimentales très privilégiées que ces équipes vont trouver sont un encouragement à un travail de longue haleine. Nombre de développements expérimentaux innovants réalisés au CNRS sont d'ailleurs transposables à d'autres domaines de recherche. Ces communautés envisagent, et proposeront à l'Andra, une organisation nouvelle de leurs travaux, sous la forme d'observatoires : Observatoire des sciences de l'univers (OSU) ou Observatoire de recherche en environnement (ORE).

Dans le futur, la démarche entreprise par la communauté des mathématiciens modélisateurs devra être appliquée à des modèles de plus en plus complexes de comportement du stockage : modèles de champ proche, transport des éléments radiochimiques par plusieurs phases ou composants, transport multispécifiques avec sorption... Pour cette communauté, le défi est de développer simultanément des modèles et des méthodes numériques, lorsque ni les propriétés mathématiques des premiers, ni les simulations numériques issues des secondes n'ont encore été rigoureusement approfondies.



Sur l'axe 1, le CNRS et les Universités, en liaison avec le CEA et notamment dans le cadre des collaborations européennes, doit approfondir l'instruction du dossier ADS (réacteurs hybrides) : un tel système dédié, constituant une seconde strate de réacteurs, est proposé comme le seul moyen aujourd'hui envisageable de résorber sans attendre l'inventaire d'actinides mineurs produits par la filière REP actuelle. On évitera ainsi de confier une tâche difficile, à la fin du siècle, aux réacteurs électrogènes à neutrons rapides. Le problème de la gestion des déchets étant intimement lié aux choix énergétiques du futur, le CNRS doit poursuivre sa contribution à l'étude de deux voies d'avenir : les réacteurs surgénérateurs à neutrons rapides (filiale uranium) et les réacteurs surgénérateurs à neutrons thermiques et à sels fondus (filiale thorium).

Sur l'axe 2, le CNRS et les Universités, en liaison avec l'Andra, ont contribué avec tous leurs moyens à l'instruction du dossier du laboratoire souterrain. Ils doivent prendre part au programme considérable qui est maintenant ouvert sur le site, dans une approche nécessairement multidisciplinaire (sciences de la terre, sciences chimiques et simulation mathématique).

Les communautés humaines sont fragiles et versatiles. Les GdR de Pace ont réussi à attirer l'attention, et surtout la collaboration d'une part importante des scientifiques du CNRS sur les problèmes scientifiques de l'électronucléaire, qui ne proposent pas une simple opportunité contractuelle, mais un renouvellement de leurs thématiques et un très vaste terrain d'essai pour leurs outils et leurs concepts. Il est important de tirer parti de l'intérêt des scientifiques sur ces sujets.

En créant le concept d'une loi organisant la recherche avant que des décisions engageant l'avenir de la société soient prises, la loi Bataille a été, pour le monde scientifique académique, une démarche leur permettant de contribuer à la solution d'un problème majeur. Cette loi fournit la démonstration de l'intérêt à associer la communauté scientifique nationale aux grands enjeux du nucléaire portés par les partenaires industriels. Le CNRS souhaite poursuivre la mobilisation des chercheurs et la formation des jeunes. La communauté est prête à continuer de travailler dans ce cadre, qui favorise un échange fécond entre recherche et industrie et fait progresser des solutions d'avenir.

