

Les déchets radioactifs : questions pour la société, questions pour les chimistes

La question de l'énergie est l'une de celles qui vont déterminer l'avenir de notre société ; en ces périodes de mondialisation, cela signifie l'avenir de l'humanité tout entière. Et le XXI^e siècle sera très probablement confronté dans ce domaine à de profondes perturbations, voire à des cataclysmes. Pour beaucoup, le recours à la production d'électricité dans le monde au moyen de réacteurs nucléaires doit être massivement accru pour repousser ces graves difficultés et prolonger la période actuelle de grande consommation d'énergie ; la situation de la France, qui produit 78 % de son électricité par la voie nucléaire pour 17 % en moyenne mondiale, devrait ainsi servir de modèle. D'autres militent au contraire pour la « sortie du nucléaire », mettant en avant ce qui a été parfois baptisé de « talon d'Achille du nucléaire », à savoir l'inévitable production de déchets radioactifs, selon eux ingérables [1].

Ce numéro de *L'Actualité Chimique* présente, sans prétention à l'exhaustivité, des études de recherches « académiques » dans le domaine des sciences chimiques, qui ont été conduites dans le cadre de la loi de 1991 (voir Glossaire). Le mot « académique » est là pour souligner que les laboratoires auteurs, qu'ils soient de l'Université, du CNRS, du CEA, ou également mais de façon moins évidente d'EDF, entreprise industrielle, procèdent, ou sont proches, de la culture de la recherche fondamentale – avec ses objectifs de publication scientifique et de progression de la connaissance. Mais, tout de suite, on aperçoit une ambiguïté : la place de la science académique est-elle vraiment légitime dans la question des déchets nucléaires, qui se présente d'abord comme une question d'ingénieurs ? Pour répondre à cette interrogation, il faut considérer globalement la question de la gestion des déchets.

La gestion des déchets radioactifs, un problème de société bien particulier

La question de la gestion des déchets radioactifs fait partie de ces « peurs » ou de ces « craintes » qui envahissent nos sociétés contemporaines [2]. La matière radioactive présente en elle-même des dangers bien réels, mais cela n'entraîne pas que les installations de stockage présentent les mêmes dangers, puisque justement elles doivent être conçues pour les gérer.

Pour les ingénieurs chargés de la production de l'électricité par voie nucléaire, la prise en compte de ces craintes du public a eu des conséquences majeures. Personne aujourd'hui, ni individu ni organisation, ne peut en effet passer outre à ces craintes et imposer, dans nos sociétés démocratiques, une technologie qui n'aurait pas l'adhésion des populations. Progressivement, les objectifs du respect de la sûreté nucléaire se sont affirmés comme impérieux, des doctrines d'applications sur les différents aspects qui y sont associés se sont développées (conception des installations, gestion

des matières, protection des travailleurs, du public...). Leur respect a permis que de grandes installations de production d'électricité nucléaire soient mises en œuvre dans la majorité des pays développés ; cependant, la demande et la sensibilité des populations ont aussi, dans de nombreux pays, imposé des limitations à la production d'électricité nucléaire, voire entraîné le bannissement de ces technologies.

C'est que la sûreté n'est pas une science exacte, puisque la radioactivité, même de façon atténuée, peut se manifester sur des durées de millénaires – voire de milliers de millénaires –, durées sur lesquelles les prévisions sont forcément très incertaines. Il est intéressant de remarquer que les mêmes arguments devraient s'appliquer renforcés dans d'autres cas, par exemple dans la gestion des déchets chimiques toxiques, où le temps n'apporte aucune atténuation de toxicité. Cependant, dans ces cas, les dispositions réglementaires comme la sensibilité du public semblent se satisfaire de prévisions à beaucoup plus court terme, à l'échelle du siècle. La question n'en reste pas moins présente : pour les déchets radioactifs, comment apporter des « preuves », complètement démontrables, de l'innocuité *ad infinitum* des installations qui seront mises en œuvre pour leur gestion ? Les approches expérimentales *stricto sensu* sont évidemment inapplicables à la lettre compte tenu des échelles de temps en jeu ; le recours à la modélisation trouve lui-même ses limites par la difficulté de validation des modèles dans de telles conditions.

On voit que le problème se déplace : il apparaît comme vain de vouloir convaincre les populations par des raisonnements uniquement ; on doit maintenant les gagner par « la transparence ». Montrer que les problèmes sont considérés à leur juste valeur – et non pas sacrifiés à des considérations à court terme ; montrer que les décisions sont soumises à des expertises et des jugements contradictoires ; montrer que les responsabilités des organisations sont bien claires et bien assumées ; montrer que les études sont faites avec soin et compétence.

La place de la science – et des sciences chimiques – dans la gestion des déchets radioactifs

C'est là que la science apparaît avec sa position d'arbitre – et les scientifiques comme intermédiaires entre les responsables des opérations pratiques et les populations. Jouissant, dans une large mesure, d'une réputation d'objectivité, le monde scientifique est souvent invoqué par les membres sensibles du public. Même si cette réputation n'est pas universellement admise, même si l'on parle parfois d'une désaffection du public vis-à-vis de la science, cette réputation conserve de sa vigueur, et les scientifiques sont appelés à jouer un rôle important.

Nulle surprise que de nombreuses branches des sciences chimiques, dans cette perspective n'apparaissent au premier plan. La description aux échelles moléculaires des phénomènes susceptibles d'intervenir dans l'évolution d'une installation de stockage aux diverses échelles temporelles et spatiales, la capacité de concevoir de nouveaux matériaux, celle de comprendre les effets des rayonnements ionisants sur les organismes vivants ; tous ces domaines ne pouvaient manquer d'être sollicités – et ils sont affaires de chimistes.

Le panorama présenté dans ce numéro spécial, des recherches en sciences chimiques déployées pour répondre aux demandes de la loi Bataille, pour non exhaustif qu'il soit montre bien la variété des approches : analyses méthodologiques des objectifs appliqués des recherches, détermination de données pour permettre les modélisations, mais aussi recherches « amont » permettant de proposer des voies non conventionnelles et de nourrir les réflexions à long terme. Certainement, les résultats obtenus par ces recherches en chimie permettront d'étayer de la meilleure façon les choix technologiques qui seront faits par les opérateurs, les hypothèses qui seront faites dans les études de sûreté. Ils pourront aussi avoir des retombées utiles à bien d'autres domaines : progrès qualitatifs dans les techniques d'extraction liquide-liquide par exemple, ou maîtrise des processus de migrations dans les sols.

Présentation du numéro

En « **Introduction** », nous avons voulu que soit présenté l'ensemble de la stratégie de recherches qui s'est mis en place en France pour répondre aux trois axes de la loi Bataille : séparation-transmutation (axe 1), stockage en formation géologique profonde (axe 2) et entreposage des déchets (axe 3).

La première partie, « **Les déchets radioactifs en France et leur gestion** », pose le problème de la gestion des déchets radioactifs dans sa dimension industrielle (les différentes catégories de déchets radioactifs produits en France et leurs quantités) et dans sa dimension scientifique (l'analyse du combustible irradié).

Le but de la gestion des déchets radioactifs est d'assurer le respect des règles de la sûreté nucléaire. Cet objectif constitue ainsi un « fil rouge » des travaux menés dans les différentes disciplines. Dans une deuxième partie, « **Sûreté nucléaire et recherche scientifique** », sont donc rappelées les bases de la radioprotection, puis la méthodologie des analyses de sûreté ; les recherches à faire sont illustrées par une étude des transferts d'éléments (donc aussi des éléments nocifs éventuels) des sols vers les plantes et donc vers la chaîne alimentaire.

Les analyses de sûreté d'une installation de stockage de déchets radioactifs en formation géologique reposent sur la prévision de relâchements de radionucléides dans la biosphère aux différentes échelles de temps – en y incluant les temps très longs qui se comptent en dizaines de millénaires. Ces prévisions nécessitent l'identification puis la modélisation des mécanismes susceptibles de conduire les éléments à la biosphère à travers les centaines de mètres de roches qui les isolent de la surface. Dans la partie « **Physico-chimie et confinement des radionucléides** », est illustrée la méthodologie des principales approches sollicitées, qui font appel à la géochimie mais aussi à la physico-chimie, à la modélisation du milieu naturel, à la chimie des équilibres en milieu poly-ionique.

Qui dit installation dit construction, et donc matériaux artificiels. Le maître mot, en l'occurrence, est celui de « vieillissement » des matériaux ; c'est sous cet angle que les matériaux *a priori* possibles doivent être sélectionnés. La partie « **Chimie des matériaux pour le conditionnement des déchets nucléaires** » présente d'abord les matériaux de matrice de conditionnement – c'est-à-dire directement en contact avec les radionucléides. Ce sont les matrices vitreuses, aujourd'hui utilisées industriellement ; ce sont aussi de nouvelles matrices potentielles, proposées par les laboratoires de chimie du solide. Parmi les performances des matériaux, la résistance à la corrosion doit être spécifiquement considérée : les objectifs appliqués sont présentés dans une contribution sur les conteneurs de déchets.

Les recherches sur matériaux modèles ne peuvent suffire à obtenir des conclusions définitives sur le comportement des installations de stockage. Dans la partie « **Laboratoires souterrains. Chimie en milieu naturel** », sont présentées des études faites directement sur le milieu naturel, là seulement où les matériaux et les systèmes ont leur réel environnement et leur réelle composition : d'une part un article sur les minéraux argileux et un autre sur l'hydrogéochimie, puis deux études plus directement représentatives des futures situations de stockage en formation géologique profonde (sur le laboratoire de Bure dans l'Est de la France et sur l'installation de Mol en Belgique).

Parmi les trois voies de recherche qui font l'objet de la loi Bataille, l'une sollicite directement la chimie moléculaire. Il s'agit de la « transmutation-séparation » (voir « Introduction »). Cette voie met en effet en jeu une séparation des actinides mineurs (c'est-à-dire au-delà de l'uranium et du plutonium) des autres éléments contenus dans les combustibles nucléaires irradiés, pour qu'ils puissent faire l'objet de traitements spécifiques. Ces recherches, qui sont illustrées dans la partie « **Chimie moléculaire** », ont fait faire des progrès importants aux techniques de l'extraction liquide-liquide, en particulier par la découverte de nouvelles molécules extractantes très spécifiques et par une approche moléculaire des procédés pratiques.

Le volume des publications doit bien sûr avoir une limite. Trois articles qui illustrent ou complètent les études présentées ici seront ainsi publiés en juillet prochain. Le premier, de Gérard Cote, montrera comment l'enseignement supérieur a pu innover pour répondre aux nouveaux besoins ; les deux autres, d'Éliane Sutter et de Daniel David, présenteront des études scientifiques sur la corrosion des conteneurs : un retour vers les mécanismes de la corrosion pour déceler le déterminant du comportement à très long terme et l'étude d'analogues archéologiques, exemples de corrosion millénaire tout à fait concrets mais loin d'être simples. Nos lecteurs sauront les joindre à ce dossier pour enrichir la vision d'ensemble, que nous avons voulu donner, de la part de la chimie dans la gestion des déchets radioactifs.



Paul Rigny et Pierre Vermeulin,
coordinateurs du numéro



Références

- [1] *Inventaire national des déchets radioactifs et des matières valorisables*, édition 2004, Andra, Parc de la Croix Blanche, 92298 Châtenay-Malabry.
- [2] *Pratiques Scientifiques et Maîtrise de l'Environnement*, ouvrage collectif coordonné par P. Rigny, coll. « Les cahiers des clubs CRIN », ECRIN, Paris, 2004.