

De fait, il se peut que le contraire soit vrai. En effet, le ralentissement de la prospection de l'uranium donne de l'importance au rôle de l'Agence en tant que conservateur des données et de l'expérience techniques acquises pendant les années de pointe. Ce large éventail d'informations et son intérêt sur d'autres plans permettent d'envisager une contribution substantielle dans divers domaines des sciences de l'environnement, tout en aidant à préserver les compétences et les connaissances techniques des prospecteurs d'uranium en prévision des besoins futurs. En outre, ces spécialistes ont montré qu'ils étaient les seuls en mesure de rendre les services nécessaires à une intervention rapide en cas d'accident nucléaire.

Seule organisation internationale à s'occuper de la prospection et de l'exploitation de l'uranium, et disposant des compétences nécessaires pour élargir l'application des données et des techniques de prospection, l'Agence ne devrait-elle obéir qu'aux tendances actuelles du marché? Son devoir ne serait-il pas plutôt d'encourager et d'aider ses Etats Membres à utiliser plus largement et plus rationnellement les crédits consacrés à la prospection de l'uranium?

Les réponses à ces questions dicteront les orientations futures de la coopération internationale dans ce domaine.

La radiochimie, science peu connue

Cette nouvelle venue fait discrètement des prodiges

par Vitomir Markovic

Il s'agit d'une branche de la chimie (certains parlent de chimie physique) qui s'occupe des transformations que subit la matière sous l'effet de rayonnements de haute énergie. Ces rayonnements déclenchent des réactions chimiques en rompant le délicat équilibre énergétique des systèmes stables. La radiochimie est en fait la sœur cadette de la photochimie, laquelle parvient aux mêmes résultats par d'autres moyens puisque c'est un rayonnement électromagnétique — la lumière — qui provoque dans ce cas les réactions. La radiochimie ne s'occupe pas des éléments radioactifs en tant que tels, qui eux relèvent de la chimie radioactive; elle ne fait que les utiliser comme sources de rayonnement, toujours physiquement séparée de la cible irradiée.

Elle s'applique déjà dans des domaines très variés, telles la thérapie, l'alimentation et l'agriculture, l'industrie manufacturière et les télécommunications. Peu nombreux sont ceux qui savent tout ce que l'on doit à cette technique encore ignorée de la plupart d'entre nous.

Historique

La radiochimie est une science nouvelle qui a vu le jour vers la fin du XIX^{ème} siècle, quelques années seulement après la découverte des rayons X. Il n'est pas surprenant que les effets chimiques des rayons X se soient manifestés sans tarder si l'on sait que même les rayons X mous (c'est-à-dire de faible énergie, entre 100 et 200 kiloélectrons-volts) sont constitués de photons, dont chacun peut exciter ou ioniser des atomes ou des molécules et briser des dizaines de milliers de liaisons moléculaires. Les premières tentatives que l'on a faites pour déterminer la nature des réactions chimiques radio-induites n'ont pas abouti, car les sources de rayonnement dont on disposait étaient trop faibles pour provoquer des transformations mesurables avec les moyens analytiques dont on disposait à l'époque et qui, rétrospectivement, paraissent très primitifs et peu sensibles.

Un long travail de défrichage s'est fait dans l'ombre et ce n'est que vers le début des années 40 que la nouvelle science a été reconnue comme telle, grâce à l'évolution rapide et aux nombreuses percées des

M. Markovic est radiochimiste à la section des applications industrielles et de la chimie, Département de la recherche et des isotopes, AIEA. Dans cet article, il se fonde en grande partie sur les débats et les conclusions de deux réunions de groupes consultatifs récemment organisées par l'AIEA, l'une au Maryland (Etats-Unis) en 1987, et l'autre à Bologne (Italie) en 1988.



sciences nucléaires. On a fabriqué des machines capables de produire des sources de rayonnement et de radio-isotopes avec des rendements insoupçonnables auparavant. Dans un premier temps, les chimistes ont été invités à collaborer à d'autres programmes, telle l'étude des effets des rayonnements sur les cellules vivantes.

Certains d'entre eux se sont bientôt aperçus que, outre la solution de problèmes d'ordre pratique, la radiochimie pouvait ouvrir de nouvelles voies vers des connaissances d'importance fondamentale pour la chimie. Un grand pas fut fait avec la découverte de l'un des plus puissants agents réducteurs chimiques, l'électron solvaté (ou hydraté). La mise au point dans les années 60 de la radiolyse éclair élargit encore le domaine de la cinétique chimique. Les plus rapides réactions contrôlées par la diffusion ont pu être directement observées. Une récente compilation (1988) contient, entre autres choses, une liste de quelque 3500 constantes de vitesse de réaction pour les principaux radicaux libres produits dans des systèmes irradiés. Cette information est du plus grand intérêt pour les chercheurs qui appliquent les rayonnements à l'étude des problèmes d'environnement et de biologie, de thérapeutique (radiothérapie), et de modélisation concernant les opérations industrielles et la technologie des réacteurs.

Il est clair que la radiochimie est devenue un important volet de la chimie. Ses méthodes et les connaissances qu'elle permet d'acquérir se prêtent à de multiples applications dans d'autres domaines de la science et dans l'industrie. Mais peut-on dire qu'elle est suffisamment connue, même des spécialistes? Il semblerait plutôt que relativement peu de scientifiques sont conscients des nombreux avantages qu'elle présente dans les principaux domaines de la chimie fondamentale et appliquée, de la chimie physique et de la biologie.

Influence sur les autres disciplines scientifiques

La radiochimie a le grand mérite de pouvoir servir à produire et étudier pratiquement toutes les espèces atomiques réactives qui jouent un rôle dans les réactions chimiques, les synthèses, les procédés industriels ou les systèmes biologiques. Ces techniques sont applicables aux milieux gazeux, liquides, solides et hétérogènes. En les combinant à celles de la chimie analytique, on peut étudier les mécanismes et la cinétique des réactions chimiques. Parmi ses applications aux autres sciences, on peut citer les suivantes:

Chimie des radicaux libres. Les radicaux libres ont une vie courte, ce sont des espèces atomiques réactives et servent communément d'intermédiaires dans les réactions chimiques. Ils jouent un rôle important dans notre environnement, notamment dans l'atmosphère (destruction de l'ozone, pluies acides, smog) et dans les procédés industriels. Ils participent à des réactions dans les cellules vivantes des plantes, des animaux et des êtres humains, et leur effet peut être aussi bien nuisible que bénéfique. Les radicaux oxy- et peroxy- formés en milieu aqueux et dans les systèmes organiques en présence d'oxygène sont spécialement importants. Les radicaux libres radio-induits détruisent les cellules tumorales et ceux qui sont présents dans notre corps tuent les organismes envahisseurs. On comprend aisément

Radiochimie

Les radiochimistes travaillent avec différentes sortes de rayonnements:

- Rayonnement électromagnétique (rayons X et gamma)
- Particules chargées (électrons, positons, protons, ions lourds)
- Particules neutres (neutrons).

Les énergies de ces rayonnements se situent d'habitude dans les gammes des kiloelectronvolts ($\text{KeV} = 10^3 \text{ eV}$) ou des mégaelectronvolts ($\text{MeV} = 10^6 \text{ eV}$). Ces énergies sont supérieures de plusieurs ordres de grandeur aux énergies d'ionisation et d'excitation nécessaires pour extraire des électrons des atomes et des molécules (quelques dizaines d'eV), ou aux énergies de liaison des atomes au sein des molécules (quelques eV). Une particule, ou quantum, de rayonnement électromagnétique peut ioniser ou exciter une multitude de molécules — d'où le fort coefficient de conversion de l'énergie radiative en effets chimiques.

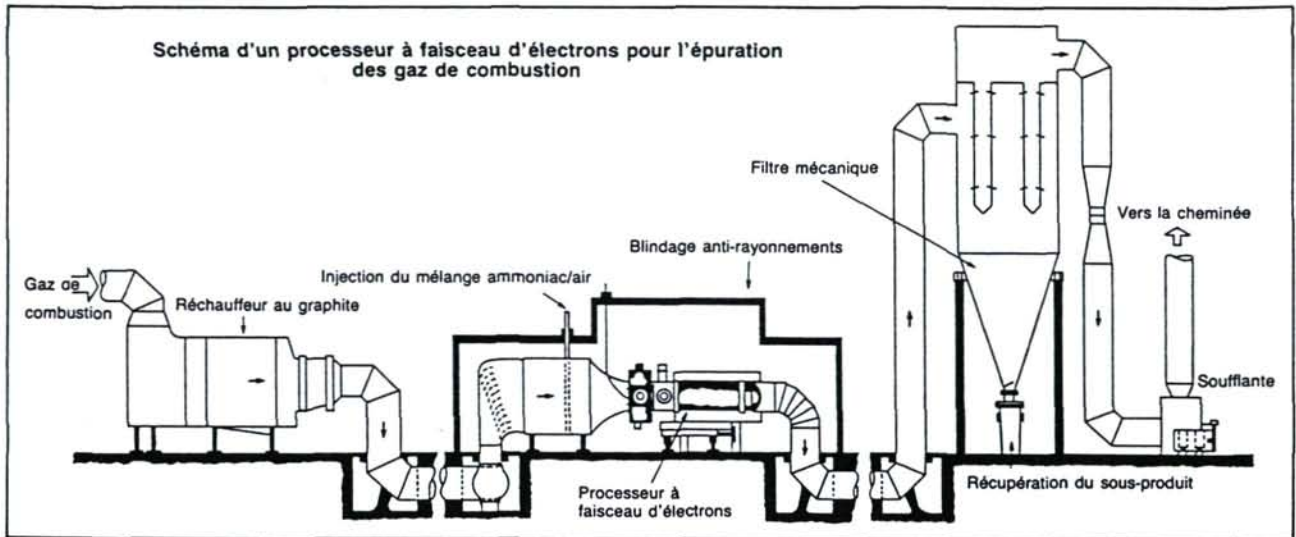
La plupart des expériences de radiochimie sont faites à l'aide de rayons gamma (du cobalt 60) ou d'électrons de haute énergie (produits par des accélérateurs de faisceaux d'électrons à des énergies de plusieurs MeV). Ce sont des rayonnements de cet ordre que l'on utilise dans les applications industrielles. Dans leur interaction avec la matière, ces rayonnements ne font que déplacer des électrons orbitaux et produisent des atomes excités, des radicaux libres et des ions. A ces niveaux d'énergie, aucune radioactivité n'est induite dans la matière exposée.

Depuis quelque temps, on s'intéresse plus particulièrement à l'emploi de faisceaux de neutrons, d'ions lourds et d'électrons de très faible énergie (bien inférieure à 0,1 MeV).

ment pourquoi la connaissance des réactions à base de radicaux libres est essentielle à des disciplines aussi diverses que la biologie, la biochimie, la médecine, la nutrition, la conservation des aliments et l'industrie. Et s'il est vrai que l'on peut obtenir des radicaux libres par d'autres moyens que la radiochimie, celle-ci demeure une source précieuse d'information.

Chimie générale (organique, minérale). La radiochimie a permis d'étudier et de déterminer pour la première fois avec précision nombre d'intermédiaires à vie courte qui interviennent dans les réactions chimiques. On a pu ainsi obtenir une abondante information qui a permis de mieux comprendre certaines réactions complexes et de modéliser différents systèmes, favorisant ainsi l'étude de processus chimiques et physiques fondamentaux, tels les transferts de charges, les transferts d'excitons et les réactions radical-radical et radical-molécule.

Cinétique chimique. La radiolyse éclair a permis de déterminer les spectres de radicaux libres extrêmement réactifs et de courte vie, d'ions radicaux et d'espèces atomiques excitées. Elle permet aussi d'observer des processus extrêmement rapides qui se déroulent couramment dans des temps très courts de l'ordre de la microseconde (10^{-6} s), de la nanoseconde (10^{-9} s) et même de la picoseconde (10^{-12} s). On utilise de brèves pulsations de faisceaux électroniques intenses en combinaison avec des techniques de détection rapide et sensible fondées notamment sur l'absorption, l'émission et la diffusion de la lumière, la conductivité (pour les espèces chargées), les spectres de résonance de spin



La radiochimie trouve une nouvelle application dans l'extraction des composants toxiques des gaz de combustion rejetés par les centrales électriques à combustible fossile. Après irradiation des gaz en présence d'ammoniac, le faisceau d'électrons extrait l'anhydride sulfureux et les oxydes d'azote que l'on récupère comme sous-produit utilisable pour la préparation d'engrais.

électronique (pour les radicaux libres) et les spectres Raman.

Chimie et technologie nucléaires. La radiochimie est essentielle si l'on veut bien comprendre et maîtriser les processus qui se déroulent dans un réacteur ralenti et refroidi à l'eau, donc exposé à des phénomènes de radiolyse. D'autres problèmes, telles la corrosion, l'acidification et la dégradation des substances organiques, sont également dus à des phénomènes radiochimiques.

Applications pratiques

Les applications de la radiochimie sont aujourd'hui très nombreuses, notamment dans l'industrie*. Mentionnons en particulier les modifications radio-induites des polymères à différents usages.

La radioréticulation de polymères est couramment appliquée dans l'industrie des fils et des câbles en vue d'améliorer la performance à haute température des matières isolantes employées par de nombreuses industries, tels l'industrie spatiale, aéronautique et automobile, l'électronique, les télécommunications et le génie civil. Le procédé facilite aussi la préparation de produits thermorétrecissables, tels que pellicules, rubans, tubes et connecteurs.

La radiostérilisation des articles médicaux jetables est un procédé dont l'emploi se généralise. On l'utilise notamment de plus en plus pour la décontamination des produits cosmétiques, de certains produits pharmaceutiques et des matières premières utilisées par l'industrie pharmaceutique. Ces applications sont naturellement fondées dans une large mesure sur la connaissance des effets des rayonnements sur la matière.

Le radiotraitement repose sur la radiopolymérisation. Il permet d'obtenir des produits de qualité supérieure par rapport à ceux que l'on traite par la chaleur ou les rayons ultraviolets et, en outre, de réduire ou d'éliminer la pollution de l'environnement et

d'abaisser les prix de revient. On l'utilise pour le traitement des surfaces, le durcissement des colles et articles stratifiés et contreplaqués, et pour fixer des motifs imprimés, par exemple.

L'irradiation des denrées alimentaires exploite les effets chimiques des rayonnements sur les produits et leurs composants, mais son acceptation dépend des résultats de l'examen biologique et organoleptique de ces produits. On peut dire que l'on en sait plus sur la chimie des produits alimentaires irradiés que sur celle des aliments cuits ou autrement traités.

Parmi les **applications nouvelles**, il faut mentionner le radiotraitement des gaz et fumées des centrales thermiques au charbon et au mazout, qui vise à en extraire les composants toxiques, tels l'anhydride sulfureux et les oxydes d'azote, afin de protéger l'environnement. Les produits extraits peuvent servir à la préparation d'engrais*. Par ailleurs, on étudie diverses applications biomédicales de l'irradiation, notamment pour traiter les surfaces d'articles en polymères ou stabiliser différentes substances biologiquement actives**.

Le point de la question

En novembre 1988, l'AIEA a réuni à Bologne (Italie) un groupe consultatif d'experts en radiochimie qui avait pour mandat d'étudier l'évolution de la situation dans les 17 pays représentés, à savoir: Allemagne (République fédérale d'), Autriche, Canada, Chine, Danemark, Etats-Unis, France, Hongrie, Inde, Israël, Italie, Japon, Pays-Bas, Pologne, République démocratique allemande, Royaume-Uni et URSS.

Les mémoires présentés à la réunion passaient en revue diverses applications de la radiochimie actuellement à l'étude. Il s'agissait notamment des systèmes à polymères d'accumulation photochimique de l'énergie, de polymères radiosensibles et radiorésistants, d'appli-

* Voir, par exemple, le *Bulletin de l'AIEA*, volume 27, n° 1 (1985), page 33.

* Voir le *Bulletin de l'AIEA*, volume 29, n° 2 (1987), page 25, et le document IAEA-TECDOC-428 (1987).

** Voir IAEA-TECDOC-486 (1988).

cations environnementales (par exemple, le traitement des polluants de l'eau), des effets de l'irradiation sur la corrosion, et de la stabilisation des médicaments et des substances biologiquement actives.

Perspectives. Vu l'importance de la contribution de la radiochimie aux connaissances scientifiques et aux opérations industrielles, à quoi faut-il s'attendre? Les possibilités qu'offre cette technologie sont-elles suffisamment connues et bien exploitées? Où en est aujourd'hui la radiochimie en tant que discipline scientifique? Où en sera-t-elle dans quelques années?

Il y a quelques points noirs.

S'il est vrai que la radiochimie est bien en place, ceux qui s'en occupent sont relativement peu nombreux. Dans l'ensemble du monde, il n'y a guère que quelques centaines de scientifiques occupés à la recherche fondamentale dans ce domaine et peut-être autant de spécialistes du radiotraitement industriel.

La plupart des pays lui consacrent de moins en moins de ressources et, plus important encore, elle disparaît des programmes de la plupart des universités, ou n'y a même jamais été inscrite.

Cette situation déplorable est due au fait que, pour faire sérieusement de la recherche dans ce domaine, il faut disposer de sources de rayonnement onéreuses telles que les accélérateurs d'électrons ou de sources gamma au cobalt 60, peut-être moins chères mais aussi moins souples et d'un usage plus limité. Il faut aussi tout un matériel d'analyse compliqué et donc cher lui aussi. Il s'ensuit que la plupart des chercheurs qui s'occupent de radiochimie sont soit basés dans des établissements orientés vers les sciences nucléaires, soit obligés de faire appel aux installations de ces établissements. En un sens, cela présente un grand avantage — la recherche a pu ainsi bénéficier d'un excellent appui technique et utiliser des sources de rayonnement — mais aussi l'inconvénient que les radiochimistes se sont trouvés le plus souvent isolés les uns des autres. De fait, on constate depuis quelques années que l'intérêt pour cette discipline dans les universités a plutôt tendance à régresser, de sorte que tant les professeurs de chimie que leurs étudiants ne savent pratiquement rien de la contribution que la radiochimie pourrait apporter à leurs travaux. Cela s'explique dans une certaine mesure : l'apport de la radiochimie est très diffus et, bien souvent, on ne le reconnaît pas comme tel.

Il est fréquent que le bilan positif des applications industrielles de l'irradiation soit dû directement à l'acquis, sur un plan plus général, de la recherche radiochimique. Or, dans les pays en développement, le transfert de la technologie de l'irradiation n'est pas toujours suffisamment soutenu par une activité de recherche fondamentale structurée. De même dans les pays industriels, où l'on a tendance à ralentir l'effort de recherche fondamentale lorsque la technique mise au point est adoptée par l'industrie. Si l'on ne redresse pas cette situation, il se peut que l'on ne profite jamais pleinement des avantages durables de la technologie de l'irradiation.

Quelques initiatives encourageantes

On peut cependant noter quelques progrès. La Malaisie, par exemple, accorde une haute priorité aux nouvelles technologies, dont celle de l'irradiation. Dans

le secteur des articles médicaux, la radiostérilisation par les rayons gamma des gants chirurgicaux est pratiquée depuis plusieurs années. Un second irradiateur gamma à usage industriel vient d'être installé au Centre d'études nucléaires des environs de Kuala Lumpur. Les responsables s'efforcent aussi de convaincre l'industrie locale d'adopter les techniques de traitement aux rayons ultraviolets et aux faisceaux d'électrons et envisagent aussi de promouvoir la radiovulcanisation du caoutchouc naturel. Conscients de la nécessité d'affermir la base technologique, le Centre d'études nucléaires a organisé en 1988, avec l'aide de l'AIEA, un cours national de formation sur les principes de la radiochimie et ses applications. Quatre conférenciers étrangers et du personnel national ont mené ce cours de 80 heures auquel ont assisté 18 stagiaires et plusieurs observateurs.

Au Japon, le Centre de recherche en radiochimie de Takasaki (TRCRE) de l'Institut japonais de recherche sur l'énergie atomique assure efficacement la liaison entre la radiochimie appliquée et l'industrie. Grâce aux efforts qui ont été entrepris en coopération, la radiochimie continue à trouver de nouvelles applications dans le domaine des polymères. Le recours au radiotraitement pour la protection de l'environnement a été étudié de façon approfondie. L'un des nouveaux projets du TRCRE a trait à l'utilisation de faisceaux d'ions en science des matériaux et en biologie. Une installation à faisceaux d'ions destinée à promouvoir la coopération internationale dans ce domaine est en projet.

Dans d'autres pays, on procède également à des échanges d'informations sur les fondements techniques de la radiochimie et ses applications. C'est ainsi qu'un grand colloque a été organisé à Marly-le-Roi (France) en 1988, auquel ont assisté une centaine de scientifiques de langue française s'occupant de recherche fondamentale ou appliquée dans le domaine de la radiochimie. Le colloque a donné l'occasion de passer en revue les résultats obtenus et de discuter de l'avenir de la radiochimie en France, pays particulièrement bien placé et actif dans ce domaine depuis longtemps déjà.

En Union soviétique, une excellente monographie très complète sur la radiochimie moderne, rédigée par A.K. Pikaev, a été publiée récemment à Moscou par Nauka (en russe seulement). Les trois volumes qui la composent traitent respectivement des principes fondamentaux et des techniques et méthodes expérimentales, de la radiolyse des gaz et des liquides, et de l'état solide et des polymères, y compris les applications.

Mesures à prendre

Pour assurer le transfert effectif de la technologie de l'irradiation aux pays intéressés, il faudrait, semble-t-il, accorder une aide plus substantielle à la recherche fondamentale dans ce domaine.

Dans l'immédiat, il conviendrait peut-être d'activer l'intégration des résultats de la recherche radiochimique dans les secteurs traditionnels de la chimie. De cette façon, la radiochimie viendrait prendre place à côté de la chimie radioactive et de la photochimie dans les programmes d'enseignement. Il faut espérer que l'Agence, en collaboration avec ses Etats Membres, saura contribuer concrètement à cet effort au titre de ses activités dans cet important domaine.