

L'enseignement de la radiochimie et de la gestion des déchets radioactifs

Gérard Cote

Résumé	Cette note dresse un panorama rapide de l'offre de formation dans le domaine de la radiochimie et de la gestion des déchets radioactifs en France.
Mots-clés	Enseignement, radiochimie, science nucléaire, gestion des déchets radioactifs.
Abstract	The teaching of radiochemistry and nuclear waste management This short paper gives a rapid overview of the training programs in the field of radiochemistry and radioactive waste management in France.
Keywords	Training, radiochemistry, nuclear science, radioactive waste management.

Contexte général

L'énergie nucléaire joue depuis 50 ans un rôle important dans la production d'électricité. Aujourd'hui, plus de 340 centrales fournissent 24 % du total de l'énergie électrique produite dans les pays membres de l'AEN (Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire). Dans certains pays, comme le Japon, la Corée et surtout, hors membres de l'AEN, la Chine, les plans relatifs à l'énergie prévoient la construction de nouvelles centrales nucléaires. Malgré une réussite technologique exemplaire, l'industrie nucléaire se heurte à la perception souvent négative du public et, aujourd'hui, à une certaine stagnation, voire à la réduction de ses activités et des programmes nucléaires financés par les pouvoirs publics. Certes, même dans les pays qui n'agrandissent pas leur parc électronucléaire, il faut du personnel qualifié pour assurer l'exploitation des centrales en fonctionnement et des installations du cycle du combustible, gérer les déchets radioactifs et préparer le futur déclassé des installations existantes. Néanmoins, après la période exaltante de création *ex nihilo* de l'industrie nucléaire et des efforts de recherche sans précédent qui l'ont accompagnée, la phase de maturité qui prévaut aujourd'hui a entraîné une certaine désaffection, voire une hostilité pour ce secteur.

Dans la plupart des pays, les programmes universitaires consacrés à la technologie nucléaire sont aujourd'hui moins nombreux que par le passé. Une étude récente de l'OCDE montre que l'enseignement et la formation dans le domaine nucléaire sont en difficulté dans nombre de pays membres de l'AEN [1]. La capacité des universités d'attirer de bons étudiants, de répondre aux futurs besoins en personnel de l'industrie nucléaire et de mener les recherches de pointe nécessaires commence à être sérieusement compromise. Le nucléaire ne se limite pas à l'électronucléaire, mais il est très rare qu'il ne soit pas perçu comme tel. Il s'ensuit que les étudiants hésitent à entrer dans ce domaine. Il y a malgré tout des raisons d'espérer. La maturité de l'industrie

nucléaire évoquée ci-dessus n'est qu'apparente et déjà de grands défis se profilent à l'horizon, comme le développement de nouveaux réacteurs de fission, de nouveaux cycles de combustibles nucléaires et, à une échéance plus lointaine, la maîtrise de la fusion. De tels projets phares mettent en exergue des besoins nouveaux de connaissance et de formation en physique, chimie, radiochimie, sciences des matériaux, modélisation, etc., autant de disciplines qu'il faudra être capable d'enseigner au meilleur niveau pour fournir à la recherche et à l'industrie les cadres dont celles-ci auront besoin [2].

Parmi les pays membres de l'AEN, la France reconstruit depuis quelques années son offre de formation. S'agissant de la gestion des déchets nucléaires, elle s'est dotée en 1991 d'une loi* structurant les recherches entre les différents organismes, y compris les centres de recherche des

Sigles

ACTINET	: Réseau européen sur la science des actinides.
CEPN	: Centre d'Étude sur l'évaluation de la Protection dans le domaine Nucléaire.
ECP	: École Centrale Paris.
ECPM	: École européenne de Chimie, Polymères et Matériaux de Strasbourg.
ENSCM	: École Nationale Supérieure de Chimie de Montpellier.
ENSCP	: École Nationale Supérieure de Chimie de Paris.
ENSTA	: École Nationale Supérieure des Techniques Avancées.
EUROPART	: Programme européen sur la séparation des actinides (EUROpean research program for the PARTitioning of minor actinides).
INPG	: Institut National Polytechnique de Grenoble.
INSA	: Institut National des Sciences Appliquées.
INSTN	: Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires.
ITU	: Institut des Transuraniens (Karlsruhe, Allemagne).
ParisTech	: Paris Institute of Technology (Grandes écoles d'ingénieurs de Paris).

universités et des écoles d'ingénieurs. A cette époque, l'enseignement de la radiochimie était déjà sur le déclin, notamment pour ce qui est de son attractivité auprès des étudiants et le Ministère de l'Éducation nationale et de la Recherche avait lancé une réflexion pour redynamiser cette discipline. A travers la loi de 1991, la structuration des axes de recherche et l'implication de nouveaux acteurs ont contribué à renouveler fortement l'intérêt pour ce secteur et à générer la création de nouveaux enseignements. L'offre de formation qui en est résultée a été spécialement adaptée à des débouchés dans l'industrie ou la recherche, attirant ainsi de bons étudiants.

L'objet de la présente note est de décrire brièvement l'offre de formation française en matière de radiochimie et de gestion des déchets radioactifs, ainsi que les évolutions en cours pour l'optimiser.

Masters et formations d'ingénieurs

Le *tableau I* dresse un panorama des principales formations de niveau master (bac + 5) dans le domaine de la radiochimie et de la gestion des déchets radioactifs. Il faut souligner ici qu'au moment où ces lignes sont écrites, l'offre de formation est en cours de restructuration avec la mise en place prévue pour la rentrée 2005 de deux masters recherche, l'un en Ile-de-France intitulé *Radiochimie : du nucléaire à l'environnement*, l'autre à Montpellier intitulé *Chimie du nucléaire, matériaux et procédés (séparation, recyclage et confinement)*. Le *tableau I* anticipe cette évolution.

Master de sciences et technologies – mention chimie – spécialité radiochimie : du nucléaire à l'environnement (Université Paris-Sud – ENSCP – ECP – INSTN)

La spécialité M2 (2^e année) de ce master devrait remplacer le DEA C2R (Chimie-Radioactivité-Radiochimie) de l'Université Paris-Sud à compter de la rentrée 2005.

Cette spécialité radiochimie correspond aux besoins exprimés par les acteurs de l'énergie nucléaire et de ses applications, tant les organismes officiels (CEA, Ministère de l'Éducation nationale, universités, CNRS, IRSN, etc.) que les acteurs industriels (EDF, AREVA, etc.). De nature pluridisci-

plinaire, elle prépare les étudiants à la recherche fondamentale et aux activités industrielles relevant du traitement des matières radioactives, ainsi qu'à l'utilisation des radioéléments, des radionucléides* et des rayonnements dans les cycles du combustible nucléaire et dans l'environnement (géosphère, biosphère).

Le programme de la spécialité M2 comprend un tronc commun constitué de quatre modules d'introduction (Radioactivité et cycle du combustible ; Radionucléides : échelle des indicateurs, structure électronique ; Solvants non aqueux et milieux extrêmes ; Stratégie et méthodologies de la mesure) et trois parcours : a) Radiochimie à l'aval du cycle du nucléaire, b) Chimie des milieux complexes et de la matière ultra-divisée et c) Traces et ultra-traces, migration des radionucléides dans la géosphère et leur comportement dans la biosphère. Un projet bibliographique et un stage dans un laboratoire de recherche réalisés au sein d'organismes variés (CEA, IRSN, IN2P3, COMURHEX, Université Paris-Sud, Université d'Évry, SUBATECH, ITU, Université de Manchester, LBLN, etc.) d'une durée de cinq mois complètent la formation. De plus, dans le cadre d'un réseau d'excellence européen (ACTINET), il est prévu que les étudiants suivent une part de leur formation (cours et formation pratique en radiochimie et auprès d'un réacteur) dans une université allemande (Mayence) avec d'autres étudiants européens.

Les principaux débouchés sont offerts par les organismes de recherche fondamentale et les secteurs industriels relevant de l'utilisation des rayonnements, du traitement des matières radioactives aux diverses étapes du cycle du combustible nucléaire (fabrication, retraitement, gestion des déchets radioactifs) ou dans le contrôle, le suivi et la caractérisation des espèces radioactives : EDF, CEA, Andra, COGEMA, CNRS, etc.

Master de sciences et technologies – mention physique et chimie – spécialité chimie du nucléaire, matériaux et procédés (séparation, recyclage et confinement) (CNMP) (Université Montpellier 2 – ENSCM – INSTN)

Il s'agit d'une formation par la recherche entièrement nouvelle, proposée par l'Université Montpellier 2 (UFR des Sciences). Elle sera ouverte à la rentrée 2005 en habilitation

Tableau I - Principales formations de niveau bac + 5 dans le domaine de la radiochimie et de la gestion des déchets radioactifs.
(* en cours d'habilitation, (** en renouvellement).

Formations et établissements	Responsables et contacts
Master de sciences et technologies – <i>mention chimie – spécialité radiochimie : du nucléaire à l'environnement</i> (*) Université Paris-Sud – ENSCP – ECP – INSTN	Pr Éric Simoni simoni@ipno.in2p3.fr
Master de sciences et technologies – <i>mention physique et chimie – spécialité chimie du nucléaire, matériaux et procédés (séparation, recyclage et confinement)</i> (*) Université Montpellier 2 – ENSCM – INSTN	Pr Christian Guérin chguerin@univ-montp2.fr
Secteur nucléaire de l'ENSCP (option de 3 ^e année du cycle ingénieur) Master de sciences et technologies – <i>mention chimie et génie chimique – spécialité chimie nucléaire</i> ENSCP – INSTN – Université de Tsinghua (Pékin) (**)	Pr Gérard Cote gerard-cote@enscp.fr
Master de sciences et technologies – <i>mention ingénierie, traçabilité, développement durable (ITDD) – spécialité gestion scientifique et technologique des déchets radioactifs</i> Université Joseph Fourier de Grenoble – INPG (ENSPG) – INSTN	Pr François Brut brut@ipsc.in2p3.fr master.valence@ujf-grenoble.fr
Master de sciences et technologies – <i>mention ingénierie, traçabilité, développement durable (ITDD) – spécialité assainissement, démantèlement des installations nucléaires</i> Université Joseph Fourier de Grenoble – INPG (ENSPG) – INSTN, Université Claude Bernard Lyon 1	Pr François BRUT brut@ipsc.in2p3.fr master.valence@ujf-grenoble.fr

conjointe avec l'ENSCM et l'INSTN/CEA. Ce master répond aux préoccupations du CEA en termes de priorité de recherche, ainsi qu'aux besoins exprimés par les acteurs de l'énergie nucléaire et de ses applications. En particulier, le développement de l'énergie nucléaire ne peut s'envisager que dans le cadre d'une gestion très rigoureuse des matières mises en jeu, qu'il s'agisse de préserver les ressources naturelles (minières) ou de minimiser l'impact à l'environnement des déchets produits. Les notions de recyclage, de confinement dans la durée des déchets ultimes, en sont une clé essentielle : elle se place au cœur des problématiques essentielles pour le futur (l'énergie, la gestion des ressources et des déchets, le développement durable).

Dans ce contexte, au cours des deux années du master, l'étudiant va acquérir des connaissances scientifiques approfondies liées à la chimie, aux sciences des matériaux et des procédés :

- en abordant la chimie séparative depuis les mécanismes élémentaires, à l'échelle moléculaire, jusqu'à la mise en œuvre des procédés appliqués à la séparation des radioéléments ;
- en s'intéressant aux matériaux de confinement, leur structure, leurs voies d'élaboration, leur caractérisation et aux divers mécanismes d'altération, y compris à très long terme ;
- en abordant les résultats de la recherche et les technologies innovantes développées dans le domaine des matériaux avancés.

Les enseignements théoriques seront assurés conjointement par des enseignants-chercheurs universitaires et des ingénieurs du CEA. Outre les enseignements pratiques habituels, l'étudiant effectuera un stage court (10 semaines) en 1^{ère} année, un stage long en 2^e année (18 semaines) en laboratoire de recherche universitaire ou du CEA, en France ou à l'étranger.

A l'issue de la formation, l'étudiant pourra s'orienter vers la préparation d'une thèse en relation avec le nucléaire ou les sciences des matériaux. Son caractère pluridisciplinaire, avec l'acquisition d'une expertise en radiochimie, en chimie des solutions, en analyse chimique, en science des matériaux et des procédés, en fait une formation particulièrement adaptée pour répondre aux besoins de très nombreuses branches d'activités s'étendant bien au-delà du nucléaire : chimie, matériaux, analyse, santé, agroalimentaire, automobile, aéronautique et spatial, environnement, etc.

Le Secteur nucléaire de l'ENSCP

A la demande du Ministère de l'Éducation nationale, de la Recherche et de la Technologie et afin de contribuer à répondre à loi de 1991, l'ENSCP a ouvert en 1998, en association avec l'ECPM de Strasbourg et en partenariat avec le CEA, la COGEMA, EDF, l'Andra, l'IPSN (devenu depuis IRSN) et l'INSTN, une option de troisième année (bac + 5) dans le domaine de la chimie et de la radiochimie à l'aval du cycle nucléaire, dite *Secteur nucléaire*.

L'objectif de l'enseignement proposé est de donner à des ingénieurs généralistes une solide *culture nucléaire* et un goût pour les technologies innovantes, par le biais d'une approche pluridisciplinaire touchant à la chimie, la radiochimie et la physico-chimie des opérations qui constituent l'aval du cycle : opérations de triage (procédés de séparation poussée – transmutation), opérations de confinement (concept multibarrière et propriétés des matériaux) et, enfin, opérations d'entreposage/stockage (étude de la réactivité chimique des radionucléides dans le

milieu naturel, de leur migration, etc.). Dès le départ, cette formation a été ouverte aux élèves ingénieurs des écoles membres de la Fédération Gay Lussac [3] et aux élèves des écoles ayant signé une convention spécifique avec l'ENSCP, par exemple l'École d'Ingénieurs de Chambéry. De cette manière, le *Secteur nucléaire* de l'ENSCP a eu dès son origine une vocation nationale et a fédéré le champ de la radiochimie au niveau des écoles d'ingénieurs relevant du Ministère de l'Éducation nationale.

Le programme de l'enseignement a été défini en collaboration avec les organismes partenaires et il est régulièrement réexaminé et modifié pour tenir compte des évolutions et des besoins nouveaux du domaine. Outre les enseignements de tronc commun propres au cycle ingénieur, les élèves suivent durant un semestre des enseignements théoriques et pratiques (160 h) axés sur la chimie, la radiochimie et la physico-chimie à l'aval du cycle nucléaire. Ils effectuent ensuite un stage de fin d'études de 5 à 6 mois dans des laboratoires de recherche en France (CEA, COGEMA, EDF, CNRS, IRSN, etc.) ou à l'étranger. Par exemple, pour l'année universitaire 2004-2005, sur un effectif de 17 élèves, 10 effectuent leur stage à l'étranger dans les laboratoires suivants : Argonne National Laboratory (E.-U.), Oak Ridge National Laboratory (E.-U.) (3 élèves), Université de l'État de Washington (E.-U.), Lawrence Berkeley National Laboratory – Université de Californie à Berkeley (E.-U.), Japan Atomic Energy Research Institute (Japon), Australian Nuclear Science and Technology Organisation (Australie), Université de Manchester (Grande-Bretagne), Université de Chalmers (Suède). Au niveau européen, les élèves bénéficient des réseaux d'excellence comme ACTINET ou EUROPART. Ainsi, par le biais des stages de fin d'études, le *Secteur nucléaire* de l'ENSCP a également acquis une dimension internationale.

A l'issue de leur formation, une partie des élèves s'orientent vers la préparation d'une thèse en relation avec le nucléaire, tandis que les autres s'engagent dans la vie professionnelle dans le domaine du nucléaire (EDF, COGEMA, CEA, Capsis Environnement, British Nuclear Fuels plc., etc.) ou dans des domaines très différents.

Master de sciences et technologies – mention chimie et génie chimique – spécialité chimie nucléaire (ENSCP – INSTN – Université de Tsinghua, Pékin)

EDF et AREVA qui ont des intérêts à l'étranger, notamment en Chine, ont souhaité que l'enseignement précédent leur permette de disposer non seulement d'ingénieurs ENSCP, mais aussi d'étudiants étrangers francophones et formés selon les principes de l'enseignement français aux disciplines relevant de la chimie nucléaire et des sciences de l'ingénieur. Ceci dans l'intention de disposer de cadres scientifiques formés en France et susceptibles de travailler dans leurs centres de recherche ou de production à l'étranger. C'est pourquoi l'ENSCP a sollicité et obtenu en 2003 l'habilitation à délivrer un master professionnel dans ce domaine, le master de sciences et technologies mention Chimie et génie chimique – spécialité chimie nucléaire. Le programme de ce master (M1 et M2) est largement adossé à la formation d'ingénieurs ENSCP et au *Secteur nucléaire*. Eu égard au développement du nucléaire en Chine (la construction de plus 30 centrales nucléaires est envisagée), un partenariat avec l'Université de Tsinghua (Pékin) devrait être mis en place en 2005 et devrait permettre l'accueil d'étudiants chinois. Il est à souligner ici que

l'objectif étant de former des cadres chinois à la culture française, tout l'enseignement sera dispensé en français, mais qu'en amont du master, une formation intensive au français sera assurée grâce à la structure mise en place par ParisTech en Chine [4].

Master de sciences et technologies – mention ingénierie, traçabilité, développement durable (ITDD) – spécialité gestion scientifique et technologique des déchets radioactifs (GéDÉRa) (Université Joseph Fourier de Grenoble – INPG (ENSPG) – INSTN)

Ce master de l'Université Joseph Fourier de Grenoble – Centre Drôme – Ardèche a une vocation plus professionnelle que les formations précédentes.

La spécialité GéDÉRa a pour but de former des ingénieurs capables de gérer les étapes de production de déchets radioactifs dans le cycle électronucléaire, depuis la mine d'uranium jusqu'au stockage des déchets radioactifs. L'ensemble de cours théoriques est complété par 15 jours de visites de sites caractéristiques (COGEMA La Hague, Andra Soulaire, Andra Bures, EDF Bugey, EDF Creys Malville, CEA Marcoule, etc.). La formation s'achève par un stage de six mois en milieu industriel.

Les diplômés exercent des fonctions d'ingénieur d'études déchets, de gestionnaire de sites d'entreposage ou de stockage, d'ingénieur chargé des effluents, d'ingénieur sécurité environnement, de chargé d'affaires agrément de colis, etc., dans l'industrie nucléaire française.

Master de sciences et technologies – mention ingénierie, traçabilité, développement durable (ITDD) – spécialité assainissement, démantèlement des installations nucléaires (Université Joseph Fourier de Grenoble – INPG (ENSPG) – INSTN, Université Claude Bernard Lyon 1)

Cette spécialité, enseignée également dans le Centre Drôme – Ardèche de l'Université Joseph Fourier de Grenoble, a pour but de former les ingénieurs spécialistes en stratégie de démantèlement, de la phase d'études préalables à la phase opérationnelle. Le programme comprend un tronc commun mutualisé avec le master précédent (GéDÉRa), des visites techniques et un enseignement de spécialité propre à l'assainissement et au démantèlement, ainsi qu'un stage de six mois en entreprise. Les diplômés sont appelés à exercer des fonctions de chef de projet démantèlement, d'ingénieur d'études démantèlement, d'ingénieur zonage déchets démantèlement, de chargé d'affaires scénario démantèlement, d'ingénieur sécurité, etc.

Autres formations

Citons également des formations de spécialisation comme :

- le cours de génie atomique de l'INSTN,
- le cycle de formation au diplôme d'ingénieur spécialiste en sciences et technologies nucléaires du Conservatoire National des Arts et Métiers,
- l'enseignement spécialisé de l'ENSTA : Aval du cycle – Système innovants pour le futur nucléaire,
- l'enseignement de l'École des mines de Nantes : Nucléaire – Techniques, sûreté et environnement,
- le master de sciences, technologie et santé – mention ingénierie pour la santé et le médicament – spécialité physique, qualité, radioprotection de l'Université Joseph Fourier de Grenoble.

Les formations précédentes sont de niveau 2^e année de master (bac + 5) et il faut constater qu'il y a peu d'enseignements de niveau 1^{ère} année de master traitant de la radioactivité et de ses applications. Seules quelques écoles comme l'ENSCP, CPE Lyon, l'INSA de Rouen, l'ENSC Montpellier, l'ECPM de Strasbourg, etc. et quelques universités proposent un enseignement d'introduction.

Formations de niveau licence

Parallèlement aux enseignements précédents, il existe deux licences professionnelles qui ont vocation à former des techniciens pour l'industrie nucléaire :

- la licence professionnelle 3D Métiers de la déconstruction, des déchets, de la dépollution du Centre Universitaire de Formation et de Recherche de Nîmes (CUFR Nîmes),
- la licence professionnelle Technique nucléaire et radio-protection de l'Université Louis Pasteur de Strasbourg.

Conclusion

Grâce à une collaboration soutenue entre les institutions universitaires (universités et écoles d'ingénieurs), les organismes de recherche (CEA, IRSN, CEPN) et les industriels (AREVA, EDF, Andra), la France développe aujourd'hui une offre recentrée sur l'état actuel des connaissances en sciences nucléaires, en radiochimie et dans les techniques nécessaires à la gestion des déchets radioactifs, ciblant aussi bien les métiers de la recherche que ceux de l'ingénierie. En cela, la France occupe une place privilégiée parmi les membres de l'AEN, mais son développement industriel nucléaire lui donne en la matière une responsabilité particulière qu'elle se doit d'assumer.

Cette offre de formation est conçue pour faciliter le développement à l'international, mais les flux au niveau des masters et des écoles d'ingénieurs sont surtout dans le sens France vers l'étranger par le biais des stages de fin d'études. Un rééquilibrage en faveur de l'accueil d'étudiants étrangers doit être recherché, notamment par la mise en place de partenariats avec des universités étrangères. Enfin, il faut souligner ici qu'une composante importante de la formation revient à diverses écoles doctorales dans le cadre de thèses financées par les acteurs du domaine (Andra, CEA, CNRS, COGEMA, EDF, IRSN, etc.) sur des sujets se rapportant au cycle nucléaire.

Notes et références

- * Voir le glossaire en page 6 du numéro 285-286.
- [1] *Nuclear Education and Training: Cause for a concern?*, Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire, OCDE, Paris, **2000**.
- [2] *Principaux enjeux et verrous technologiques au début du XXI^e siècle. Synthèses des rapports sur la Science et la Technologie*, Académie des sciences, Paris, avril **2004**.
- [3] La Fédération Gay Lussac regroupe 17 écoles d'ingénieurs chimistes ou physico-chimistes (<http://www.gaylussac.net/index.html>).
- [4] <http://www.paristech.org/anglais/index.html>



Gérard Cote
est professeur à l'ENSCP*.

* École Nationale Supérieure de Chimie de Paris, Laboratoire d'électrochimie et de chimie analytique (UMR 7575), 11 rue Pierre et Marie Curie, 75231 Paris Cedex 05.
Courriel : gerard-cote@enscp.fr