

# Techniques nucléaires et élimination des déchets solides non radioactifs

*Les métaux lourds et autres polluants environnementaux présents dans les déchets solides sont souvent mis en évidence et analysés par des méthodes nucléaires*

par Sheldon  
Landsberger et  
Bruce Buchholz

L'élimination des déchets solides d'origine industrielle ou urbaine pose aux autorités locales, fédérales et nationales un problème permanent de santé publique extrêmement grave.

On s'intéresse de plus en plus à la surveillance, au contrôle et à l'élimination des constituants chimiques de ces sources de déchets. On sait aujourd'hui par exemple que le rejet des sous-produits de centrales thermiques au charbon — à savoir les aérosols solides, les cendres résiduelles et les cendres volantes — peut nuire à la qualité de l'air et de l'eau. L'incinération ou la décharge directe des déchets solides urbains, dont la forte teneur en métaux lourds constitue un danger pour l'environnement, suscite également de grandes craintes. L'utilisation de très grandes quantités de minéraux dans de nombreux traitements industriels peut aussi déboucher sur des problèmes de gestion des déchets quelque peu complexes.

C'est pourquoi il importe de disposer de techniques d'analyse chimique fiables permettant d'évaluer l'incidence des pratiques largement répandues d'élimination des produits chimiques organiques et inorganiques. Scientifiques et techniciens utilisent de plus en plus les méthodes d'analyse nucléaires et apparentées — activation neutronique, fluorescence X dispersive en énergie et émission X induite par des particules. Très utiles dans le domaine que nous étudions ici, elles servent à la fois à détecter les différents polluants (par exemple les métaux lourds toxiques) et à doser les divers composants des sources. On a aussi largement recours à d'autres techniques nucléaires, celle des traceurs

isotopiques par exemple, pour caractériser les modes de diffusion des métaux dans le sol et l'eau et les mouvements de la pollution des eaux. Ces paramètres sont importants pour expliquer la présence dans la nappe phréatique de lixiviats mobiles et immobiles provenant de déchets solides et pour prévoir leur comportement général dans l'environnement.

## Techniques nucléaires et apparentées

*L'analyse par activation neutronique* permet de déterminer 40 à 50 éléments dont bon nombre affectent l'environnement (antimoine, arsenic, cadmium, chrome, cuivre, mercure, nickel, sélénium, vanadium, zinc, etc.). Elle permet également de doser d'importants éléments tels que le sodium, le chlore et le potassium, ainsi que de nombreux lanthanides. Le dosage s'obtient en mesurant la radioactivité induite par irradiation de l'échantillon dans un réacteur de recherche. La décroissance radioactive de chaque élément donne un spectre d'énergie gamma caractéristique. Cette «signature» nucléaire spécifique peut alors être mesurée et quantifiée.

L'analyse par activation neutronique mesure la teneur totale d'un élément dans un matériau, indépendamment de sa forme chimique ou physique. Elle offre les avantages suivants:

- Les échantillons peuvent être liquides, solides ou en poudre;
- Elle est non destructive et, comme aucun traitement chimique préalable n'est requis, il n'y a aucun risque de contamination par le réactif;
- De nombreux éléments peuvent être analysés simultanément sans problème;
- Elle est extrêmement sensible aux éléments-traces.

Ces facteurs ont considérablement abaissé les seuils de détection de nombreux éléments par rapport à d'autres techniques. De plus, la présence de

M. Landsberger est maître de conférences au Département de génie nucléaire de l'Université de l'Illinois, 103 South Goodwin Ave., Urbana, Illinois, USA 61801, et membre de l'Institut des études environnementales. M. Buchholz prépare une thèse de doctorat au Département de génie nucléaire.



L'usine d'incinération des déchets urbains de Vienne, dont la façade est l'œuvre du peintre viennois F. Hundertwasser. (Photo: E. Schauer, Vienne)

matières organiques dans l'échantillon ne gêne aucunement l'analyse par activation neutronique, alors qu'elle pose de sérieux problèmes avec certaines méthodes chimiques traditionnelles.

**Fluorescence X dispersive en énergie (FXDE) et émission X induite par des particules (EXIP).** Avec ces deux techniques, on quantifie les concentrations en détectant les rayons X. La première consiste à exposer l'échantillon aux rayons X d'un tube ou d'une source radioactive. La seconde consiste à bombarder l'échantillon avec des particules chargées, généralement des protons, qui provoquent un rayonnement X. Ces deux méthodes présentent des avantages similaires à ceux de l'analyse par activation neutronique. Si elles ne permettent pas en général de détecter autant d'éléments que l'analyse par activation neutronique, elles sont capables en revanche d'en détecter certains, comme le soufre et le plomb, qui échappent à cette dernière.

**Technique du traceur isotopique.** Cette technique consiste à injecter, sous forme d'un radioisotope soluble, des quantités infimes de radioactivité dans un système environnemental solide ou aqueux, puis à les détecter pour déterminer leur cheminement. Cette méthode est employée avec succès en hydrologie et son application aux problèmes environnementaux s'est généralisée.

On utilise le plus souvent des isotopes du brome, du cadmium, du chrome, du césium, du chlore, du sodium et du zinc. La plupart de ces radionucléides ont des périodes relativement courtes par rapport aux déchets nucléaires et conviennent donc parfaitement pour des études en temps réel.

## Installations dans le monde

Plus de 250 réacteurs de recherche sont aujourd'hui utilisés pour les travaux courants de surveillance et de recherche environnementales faisant appel à l'analyse par activation neutronique. Un grand nombre d'universités, de laboratoires nationaux et d'établissements privés disposent également d'installations d'analyse, à savoir plus d'une centaine pour l'EXIP et bien plus encore pour la FXDE.

Les scientifiques experts en analyse sont assez nombreux pour justifier l'emploi continu de ces méthodes nucléaires et apparentées dans la recherche sur les déchets solides. Voici un aperçu de quelques-uns des programmes qui, à travers le monde, ont recours à des techniques efficaces.

## Aérosols solides

Ces vingt dernières années, de nombreuses études ont été entreprises pour définir la destination finale et le transport des aérosols de métaux lourds rejetés dans l'atmosphère par les centrales thermiques au charbon, les incinérateurs de déchets, divers procédés de fusion, les automobiles, les opérations industrielles en usine, etc.

L'échantillonnage et l'analyse des aérosols solides se justifient en ce qu'ils permettent de mesurer les teneurs totales en particules qui risquent de nuire à la santé, d'évaluer l'exposition en vue d'apprécier le risque, de réunir les informations

Élément	Cendres volantes	Sol
Argent	31,4-60	0,1
Aluminium	1,07-11,1%	7,1%
Arsenic	75,3-229	6,0
Barium	< 700-1300	500
Brome	1420-5180,00	5
Calcium	8,44-28,1%	1,37%
Cadmium	80,4-314	0,06
Cérium	4,42-51,90	50
Chlore	3,6-20,9%	100
Cobalt	4,78-37,3	8
Chrome	94,1-865	100
Césium	2,06-3,31	6
Fer	0,26-2,12%	3,8 %
Mercure	18,5-209	0,03
Indium	0,49-1,91	—
Lanthane	2,47-27,9	30
Manganèse	180-1000	850
Sodium	1,52-2,83%	0,63%
Rubidium	12,2-40,6	100
Antimoine	618-1665	(2-10)
Scandium	0,89-8,37	7
Sélénium	< 2,51-10,9	0,2
Silicium	< 1,21-17,0%	33%
Samarium	< 0,43-4,6	—
Strontium	< 600	300
Tantalum	< 0,24-3,36	—
Thorium	0,79-9,10	5
Titane	0,25-2,46%	5000
Vanadium	< 9,93-81,1	100
Zinc	8690-18 200	50

Note: Sauf indication contraire, les concentrations sont exprimées en microgrammes par gramme.

Les données sont tirées d'une étude réalisée à l'Université de l'Illinois.

### Teneur des cendres volantes et du sol en éléments provenant d'une installation d'incinération des déchets solides urbains

permettant de le gérer ou d'effectuer des contrôles aux fins d'études épidémiologiques, activités qui permettent de vérifier aussi si les lois ou règlements sur la qualité de l'air sont respectés. Enfin, l'étude des processus de transport atmosphérique, de transformation et de dépôt peut exiger une caractérisation systématique des particules.

Les échantillonneurs d'air sont généralement placés dans des endroits stratégiques des zones urbaines et rurales ou dans des secteurs isolés. Les filtres d'air sont d'abord analysés, puis les résultats sont éventuellement traités à l'aide de divers modèles mathématiques pour renseigner sur les sources de pollution atmosphérique élémentaire ou évaluer l'impact sanitaire sur le grand public ou les travailleurs de l'industrie.

Toutes les techniques dont on vient de parler sont très utiles pour analyser des filtres d'air dont la teneur en aérosols solides est en général très faible. Un certain nombre de pays, dont l'Allemagne, l'Argentine, la Belgique, le Brésil, le Canada, le Chili, la Chine, les Etats-Unis, la Grèce, la Hongrie, l'Inde, le Nigeria, la République slovaque, la Répu-

blique tchèque, la Turquie, le Viet Nam et le Zaïre, participent à des études de ce genre dans le cadre d'un programme de recherche coordonnée appuyé par l'AIEA.

### Déchets solides

Les déchets solides le plus couramment analysés par des méthodes nucléaires, notamment par activation neutronique, sont peut-être les résidus de la combustion du charbon, à savoir les cendres résiduelles et les cendres volantes.

L'utilisation du charbon pour produire de l'électricité à des fins industrielles, domestiques et commerciales, ainsi que pour le chauffage, augmente régulièrement dans le monde.

Ce recours massif au charbon se traduit par le rejet de millions de tonnes de cendres résiduelles et de cendres volantes qu'il convient de gérer correctement. De nombreuses études ont également été entreprises pour déterminer quels sont les éléments contenus dans les déchets solides, notamment les métaux lourds comme le plomb, l'arsenic, le mercure, le cadmium, l'antimoine, etc., qui risquent d'être lixiviés et de menacer éventuellement la nappe phréatique.

Ces dernières années, l'élimination des déchets solides urbains est devenue un problème majeur tant écologique que politique. La plupart de ces déchets sont enfouis, mais subsiste le fâcheux problème de la lixiviation par les infiltrations d'eaux de pluie et par le méthane résultant de la décomposition. Eviter la mise en décharge devient de plus en plus difficile et les solutions de rechange telles que le recyclage ne résolvent que partiellement le problème. L'incinération permet de réduire de 80 à 90% le volume et la masse des déchets mais les cendres résiduelles contiennent de fortes concentrations de nombreux métaux lourds, tels que le plomb, le cadmium, le mercure, l'antimoine, le zinc et l'argent. Ces métaux sont un danger réel pour la nappe phréatique, et des études à long terme sur leurs composés, leur répartition et leur solubilité s'imposent.

L'AIEA a publié récemment un document technique détaillé contenant des indications pour l'étude de la lixiviation des cendres volantes de charbon et autres déchets solides et recommandant tout particulièrement l'emploi de méthodes nucléaires\*. Ce document traite plusieurs aspects importants dont la caractérisation physique, la distinction entre différents essais de lixiviation, l'échantillonnage sur le terrain et l'application de radio-indicateurs.

Dans notre laboratoire de l'Université de l'Illinois, nous avons employé une série de techniques d'analyse par activation neutronique pour déterminer 30 éléments traces dans les cendres

\* *Guidelines for Leaching Studies on Coal Fly Ash and Other Solid Wastes with Special Reference to the Use of Radioanalytical Techniques*, IAEA TECDOC-616, Vienne (1991).

volantes résultant de l'incinération de déchets solides urbains\*. La distribution granulométrique est une caractéristique physique importante. Les résultats montrent que plus de 75% des cendres volantes consistent en particules d'un diamètre inférieur à 63 microns (voir l'histogramme). Ces particules fines ont une aire de dispersion importante et les possibilités de lixiviation sont d'autant plus nombreuses. Nos données confirment que la plupart des éléments potentiellement toxiques se concentrent sur les particules les plus fines. Par rapport aux valeurs normales dans le sol, les cendres volantes sont extrêmement riches en de nombreux éléments dont l'antimoine, l'arsenic, le cadmium, le chrome, l'indium, le mercure, l'argent et le zinc (voir le tableau). Ces éléments peuvent servir de marqueurs de source.

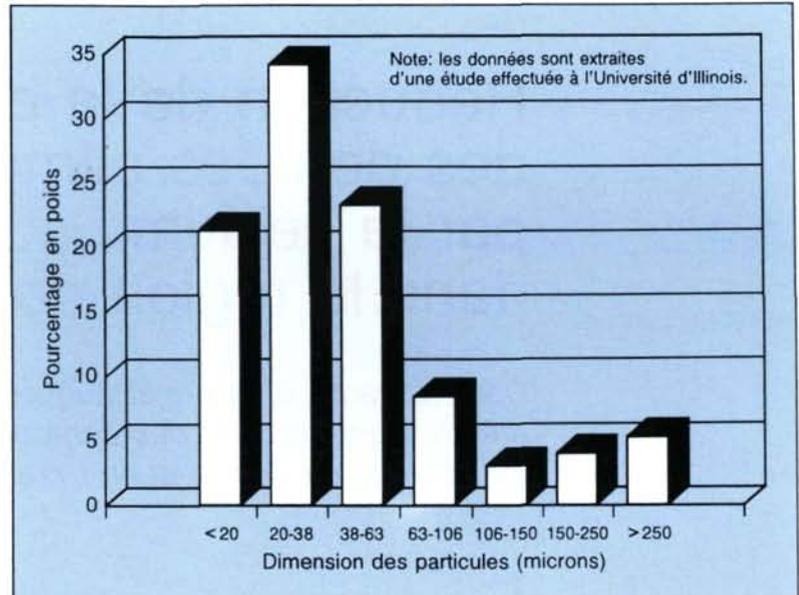
Lors des études sur l'incinération des déchets solides urbains, la plupart des chercheurs ont négligé un point capital: la caractérisation élémentaire des articles ménagers courants. On sait par exemple que les batteries au plomb et les piles sèches ordinaires contribuent largement à la teneur en plomb, en mercure, en cadmium, en cuivre et en zinc des cendres d'incinérateurs. Des chercheurs néerlandais et canadiens ont montré récemment, par activation neutronique, que diverses matières plastiques provenant des ordures ménagères sont une source majeure de cadmium. Aussi est-il particulièrement prudent de recenser les articles ménagers courants pouvant contenir ces métaux lourds, car cela poussera peut-être les industriels à modifier leurs procédés de traitement et à réduire sensiblement en quantité, sinon à éliminer, les métaux lourds entrant dans le flux de déchets.

Les déchets solides industriels posent également un sérieux problème. A la différence des déchets solides urbains, ils présentent généralement une variété moins grande de métaux lourds, mais les quantités et les concentrations peuvent être supérieures de plusieurs ordres de grandeur. Cela est particulièrement vrai pour les déchets des industries minéralurgiques. Les décharges et les cours d'eaux sont généralement les réceptacles des déchets industriels. Nombreux sont les pays qui font appel aux méthodes nucléaires et apparentées pour identifier chimiquement les déchets eux-mêmes et étudier leurs caractéristiques de lixiviation.

Les techniques isotopiques utilisant couramment des traceurs radioactifs servent à des études très diverses. Certaines applications ont été signalées récemment lors du Colloque international sur les applications des isotopes et des rayonnements à la protection de l'environnement\*\*. Mentionnons notamment les travaux suivants:

\* «Elemental Characterization of Size-Fractionated Municipal Incinerator Ash», S. Landsberger, B.A. Buchholz, M. Plewa et M. Kaminski, *J. Radioanal. Nucl. Chem.* (sous presse 1993).

\*\* Voir le compte rendu du colloque publié par l'AIEA, STI/PUB/904, Vienne, Autriche (1992).



- Définition de la dispersion des effluents industriels rejetés à différents moments de la marée en Malaisie;
- Prédiction des taux de migration des polluants de déchets enfouis ou autrement stockés grâce au radiomarquage des éléments toxiques dans le sol, en Hongrie;
- Détermination des temps de séjour et des modes d'écoulement des déchets et des boues résiduelles dans les installations de traitement des eaux usées, en République tchèque et en République slovaque;
- Etude de l'efficacité des systèmes polonais de traitement des effluents liquides industriels.

En France, des techniques isotopiques ont été récemment utilisées pour évaluer le risque associé aux déchets de l'industrie sidérurgique, et pour étudier des couvertures artificielles et des barrières de confinement pour les décharges de déchets industriels et urbains, ainsi que le recyclage de déchets pour la sylviculture et l'industrie.

### Une question de plus en plus cruciale

Il est peu probable que le problème de l'élimination des déchets solides se relâche un jour. Attendu que les pays en développement et les pays développés brûlent de plus en plus de combustibles fossiles, développent leurs industries et consomment davantage de biens et de services pour améliorer leur niveau de vie, l'élimination des déchets solides demeurera un volet essentiel de la gestion des déchets.

Les techniques analytiques nucléaires et apparentées peuvent être optimisées à bon escient pour l'étude des déchets solides industriels et urbains en suspension dans l'air, et de leurs lixiviats, et pour prévoir leur mode de transport dans l'environnement.

### Distribution granulométrique des éléments traces dans les cendres volantes provenant d'une installation d'incinération des déchets solides urbains