

Développement durable et production d'électricité: impacts comparés de l'évacuation de déchets

L'AIEA et d'autres organisations cherchent à faire une étude comparative des déchets des chaînes énergétiques et de leur gestion

par Roger Seitz

Les effets que l'évacuation de déchets peut avoir sur la santé et l'environnement ne cessent de préoccuper les responsables du développement durable de l'humanité. Ces déchets proviennent de diverses activités (mines et carrières, agriculture, industrie, production d'électricité, médecine, etc.). Lorsqu'ils sont bien gérés, ils ne représentent qu'un risque minimal pour la santé et l'environnement de l'être humain.

Le souci écologique est dû à ce que la quantité de déchets augmente sans cesse à cause de la croissance démographique, de l'industrialisation et de l'urbanisation. Il s'ensuit que l'un des problèmes que pose l'élaboration d'une stratégie du développement durable consiste à trouver les moyens de favoriser la croissance économique et l'amélioration de la qualité de la vie tout en limitant le volume des déchets et le risque qu'ils impliquent, ainsi que leur incidence sur la santé et l'environnement.

Or, ce développement propice à l'amélioration des conditions de vie d'une population mondiale en expansion suppose une consommation croissante d'énergie, notamment d'électricité. Tant que l'on n'aura pas trouvé un nouveau moyen de répondre à la demande croissante d'électricité, la seule possibilité de subvenir pratiquement à tous les besoins sera le recours aux combustibles classiques (charbon, gaz naturel, pétrole et uranium/thorium). Pour un développement durable, il faut donc tenir compte des déchets produits par toutes les chaînes énergétiques qui utilisent ces combustibles.

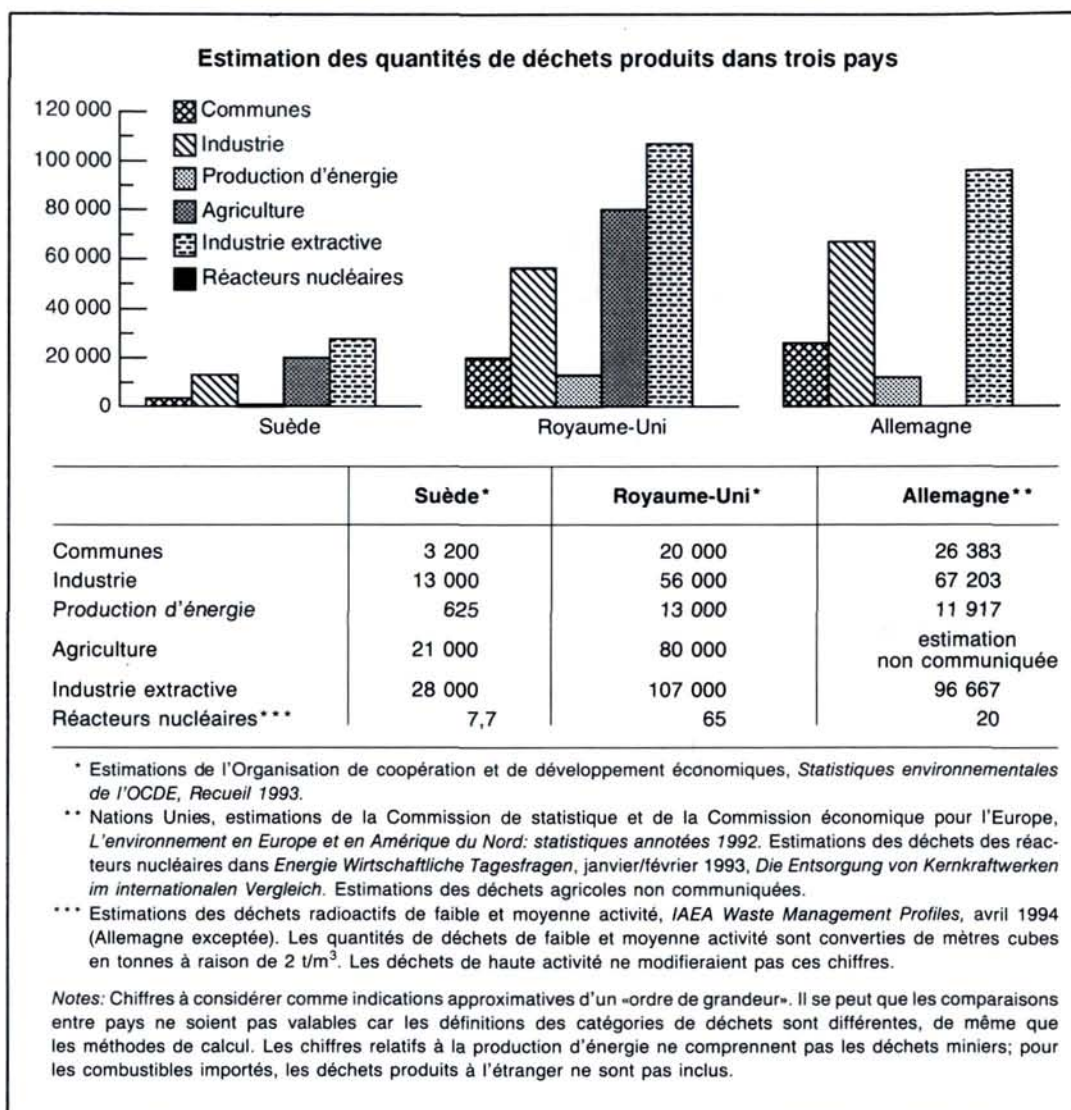
Nous donnerons ici une vue d'ensemble des premiers stades d'un projet de l'AIEA visant à comparer les déchets de différents systèmes de production d'électricité, ainsi que les méthodes d'élimination de ces déchets, et à examiner les diverses manières d'évaluer et de comparer les effets de l'évacuation de ces derniers sur la santé et l'environnement. Dans ce contexte, le rôle de l'énergie nucléaire est mis

en vedette et cet article montrera notamment que la quantité de déchets imputable à l'option nucléaire est modeste comparée à celle de toutes les autres options énergétiques et activités associées. Les principaux déchets de tous les stades des chaînes énergétiques de production d'électricité, ainsi que leurs méthodes d'élimination, seront examinés (les effluents liquides et gazeux rejetés directement dans l'atmosphère ou les masses d'eau naturelles ne seront pas inclus). Nous verrons qu'il importe avant tout de considérer tous ces stades qui nous renseignent sur les quantités considérables de déchets ayant un impact potentiel à longue échéance, qui proviennent de systèmes de production d'électricité souvent jugés «propres». Nous parlerons aussi des radionucléides présents dans nombre de déchets d'origine non nucléaire.

Gestion des déchets et développement durable

L'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) a calculé que ses Etats Membres ont produit environ neuf milliards de tonnes de déchets solides en 1990. Malgré les mesures restrictives appliquées ces dernières années dans l'industrie nucléaire et les autres secteurs, la production de déchets continue d'augmenter. Selon le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE), il semble que les mines et carrières et l'agriculture (fumier, résidus de récolte, etc.) sont les principales sources de déchets. Les données concernant les pays membres de l'OCDE et les chiffres communiqués par la Commission de statistique et la Commission économique pour l'Europe (ONU) corroborent la conclusion générale du PNUE. On constate également d'après ces données que, dans certains pays, une forte proportion des déchets solides est imputable à l'industrie, aux communes et à la production d'énergie (voir le graphique). Il est intéressant de noter que les déchets radioactifs des centrales nucléaires ne représentent qu'une petite fraction des déchets de toute la production d'énergie.

M. Seitz est membre de la Division de la sûreté radiologique et de la sûreté des déchets, à l'AIEA. Pour tout complément d'information, s'adresser à l'auteur.



Le volume sans cesse croissant des déchets et les aménagements à prévoir pour protéger la santé et l'environnement ont amené plusieurs organisations des Nations Unies à s'occuper de la gestion des déchets. La Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement (CNUED), réunie à Rio de Janeiro en juin 1992, a donné l'occasion d'examiner les stratégies du développement durable sous l'angle de la gestion des déchets et de plusieurs autres questions relatives à l'environnement. Le programme de l'Action 21 adopté par la CNUED montre toute l'importance du problème. Trois chapitres sont spécialement consacrés à la gestion des déchets et plusieurs autres y font allusion.

Par le biais de la CNUED et de l'Action 21, les Nations Unies et les gouvernements de tous les pays ont appelé l'attention du monde entier sur la nécessité d'une stratégie globale pour le développement durable de la société humaine. L'Action 21 souligne à plusieurs reprises que cette stratégie doit néces-

sairement prévoir la réduction du volume des déchets, tout en précisant que, quel que soit le succès des efforts pour y parvenir, le développement continuera de produire des déchets qu'il faudra toujours être en mesure d'évacuer pour protéger la santé et l'environnement. Les données dont on dispose confirment que l'option nucléaire n'en produit qu'un volume minimal et peut contribuer positivement à une stratégie mondiale de propreté et de développement durable.

Projets et programmes de l'AIEA

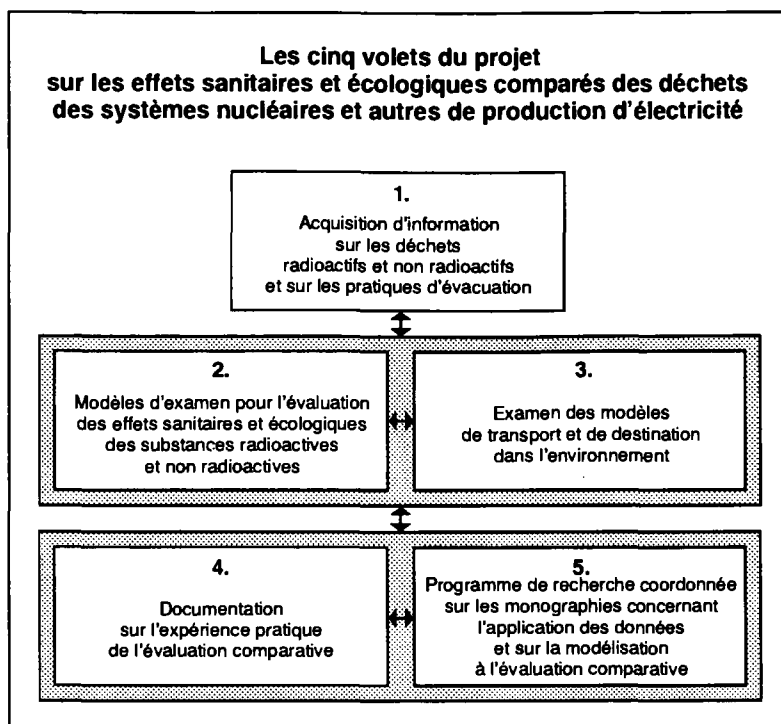
L'AIEA a entrepris un programme d'évaluation comparative concernant le rôle de l'électricité nucléaire dans une stratégie mondiale de production propre et de développement durable et consistant à examiner les effets sanitaires et écologiques, ainsi que les coûts des diverses options de production

d'électricité à tous les stades des chaînes énergétiques, en période d'exploitation normale et en cas d'accident. Le projet DECADES lancé par l'AIEA en collaboration avec plusieurs autres organisations internationales est au cœur de ce programme. Il vise à faciliter l'inclusion des problèmes de santé et d'environnement dans l'évaluation comparative des diverses chaînes et stratégies énergétiques destinée aux planificateurs et aux décideurs du secteur de l'énergie. Il prévoit en particulier la mise au point de moyens informatiques (bases de données, logiciels de modélisation, etc.) pouvant faciliter le processus décisionnel.

Nous examinerons dans cet article une partie du programme global de l'AIEA, qui se situe un peu à l'écart du projet DECADES. En 1995, l'AIEA a entrepris un projet visant essentiellement à comparer les méthodes d'évaluation des conséquences sanitaires et écologiques de l'évacuation des déchets radioactifs et non radioactifs des systèmes nucléaires et autres de production d'électricité. Ce projet vise à 1) collecter, évaluer et diffuser parmi les Etats Membres des données et des renseignements concernant les effets sanitaires et écologiques potentiels de l'évacuation de ces deux catégories de déchets; 2) évaluer et mettre à l'essai diverses méthodes permettant de juger et de comparer les effets possibles de cette évacuation sur la santé et l'environnement.

Plusieurs organisations — l'Organisation maritime internationale (OMI), l'Organisation mondiale de la santé (OMS), l'Organisation des Nations Unies pour le développement industriel (ONUDI), le PNUE et son secrétariat pour la Convention de Bâle, l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO) et le Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants (UNSCEAR) — ont toutes contribué, officiellement ou non, à ce projet en prenant une part active aux réunions, en participant à la rédaction ou à l'examen de rapports ou simplement en communiquant une information utile.

Le projet prévoit cinq opérations à la fois itératives et parallèles (*voir l'encadré*): 1) préciser et comparer les quantités et les caractéristiques générales des déchets des systèmes de production d'électricité et d'autres sources, ainsi que les méthodes d'évacuation; 2) et 3) étudier respectivement les méthodes utilisées pour évaluer les effets sanitaires et écologiques des substances radioactives et non radioactives, et les modèles de transport et de destination dans l'environnement de divers types de déchets — ces deux opérations fourniront des données permettant d'évaluer et de comparer quantitativement les risques sanitaires et écologiques que comportent les déchets; 4) et 5) documenter l'expérience pratique acquise par l'essai des méthodes et des modèles ci-dessus concernant les évaluations des effets sanitaires et écologiques potentiels des déchets des systèmes nucléaires et autres de production d'électricité — la cinquième opération visera à obtenir cette expérience par des études de cas dans



le cadre d'un programme de recherche coordonnée auquel participeront des experts de plusieurs pays.

Les données sur les déchets et sur les méthodes d'évacuation pourront servir à compléter les bases de données constituées au titre du projet DECADES. Toutefois, vu la diversité des déchets, des méthodes d'évacuation et des conditions environnementales sur les sites, ainsi que les problèmes très particuliers de la modélisation des rejets et de leur migration à long terme à partir des installations d'évacuation, les méthodes d'évaluation sont examinées de préférence séparément des méthodes plus traditionnelles d'évaluation des risques concernant l'atmosphère et l'exploitation. Ces opérations visent surtout à examiner et à tester des formules de modélisation indépendantes pour l'évaluation et la comparaison des effets à court et à long terme de l'évacuation des déchets de diverses chaînes énergétiques, et à fournir une information en retour sur l'efficacité de différents modèles dans différentes situations qui puisse aider les Etats Membres à choisir les formules les mieux adaptées à leurs circonstances particulières.

Les résultats d'évaluations comparatives des effets sanitaires et écologiques de divers types de déchets solides peuvent être exploités à plusieurs fins: 1) dans le cadre d'une comparaison générale de l'impact de différents systèmes énergétiques; 2) pour faciliter la décision en matière de politique et de gestion des déchets, en permettant de comparer les effets de différents types de déchets et de diverses stratégies de gestion/évacuation; 3) pour évaluer l'impact potentiel de l'évacuation de déchets contenant des radionucléides, des éléments ou composés non radioactifs toxiques, ou les deux à la fois.

Teneur de diverses matières en radionucléides

Matières	Teneurs en radionucléides (moyennes ou maximales)
Tartre et boues dans les circuits de traitement des effluents aqueux	jusqu'à 5 000 Bq/g (^{226}Ra) (moyenne entre une et plusieurs centaines de Bq/g)
Boues dans les circuits d'alimentation en gaz naturel	jusqu'à 100 Bq/g (^{226}Ra)
Boues des bassins d'effluents aqueux	jusqu'à ~ 40 Bq/g
Charbon/lignite	0,001-100 Bq/g (uranium)
Tourbe	jusqu'à 50 Bq/g (uranium)
Déchets géothermiques	~ 5 Bq/g (^{226}Ra)
Morts-terrains des mines d'uranium	~ 1 Bq/g (^{226}Ra)
Déchets du traitement de l'eau potable	boues ~ 1 Bq/g (^{226}Ra) résines ~ 1 000 Bq/g (^{226}Ra)
Engrais phosphatés	~ 5 Bq/g (^{238}U)
Déchets du traitement des phosphates naturels	laitier ~ 1 Bq/g (^{226}Ra) tartre ~ 40 Bq/g (^{226}Ra)
Déchets du traitement des minerais	~ 1 Bq/g (^{226}Ra)

Notes: Ces chiffres indiquent des maximums, des moyennes de séries déterminées de données, ou des valeurs extrêmes. La plupart n'indiquent que la radioactivité due à un seul radionucléide, même si l'on sait que plusieurs autres radionucléides sont présents, de sorte que les niveaux de radioactivité sont très approximatifs.

Déchets des chaînes énergétiques de production d'électricité

Diverses sources d'énergie servent à produire de l'électricité: les sources «classiques» (charbon, gaz naturel, pétrole et uranium/thorium) et les sources «renouvelables» (rayonnement solaire, énergie éolienne, eaux de surface, biomasse et géothermie). Bien que l'exploitation proprement dite de l'énergie solaire, éolienne ou hydraulique, par exemple, ne produise pas nécessairement de déchets, à part ceux de la maintenance et autres travaux de caractère général, des déchets comportant des risques à long terme proviennent de l'extraction et du traitement des matières premières servant à la fabrication des cellules photovoltaïques, des machines éoliennes et des barrages, et du déclassement de ces installations.

Pour distinguer les divers déchets radioactifs et non radioactifs d'un système déterminé de production d'électricité, il est commode de les classer selon les différentes étapes de la chaîne énergétique. Aux fins de cet article, nous considérons une chaîne énergétique type comprenant l'extraction et la préparation du combustible, l'exploitation de la centrale

et son déclassement. A noter que les déchets de la construction, de la maintenance, du transport et des procédés de traitement, selon les cas, doivent être étudiés à chaque étape de la chaîne.

Dans l'optique du public, il est fréquent que la plupart des déchets de la production d'électricité à l'aide de combustibles classiques soient perçus comme résultant de l'exploitation des centrales (cendres, combustible nucléaire épuisé). Or, rappelons que, selon les données présentées par la Commission de statistique et la Commission économique pour l'Europe, l'OCDE et le PNUE, l'une des deux sources de déchets les plus importantes du monde est l'industrie minière.

Cela est également vrai pour le secteur de la production d'électricité. Des volumes relativement importants de déchets sont produits, dans plusieurs systèmes de production d'électricité, au niveau de l'extraction du combustible (charbon, gaz naturel, pétrole et uranium/thorium). Les chiffres cités par les deux commissions mentionnées ci-dessus indiquent qu'en Allemagne plus de 80 % des déchets de l'industrie extractive proviennent des mines de charbon. De même, l'extraction de minéraux destinés aux matériaux de construction (métaux, ciments, etc.), aux procédés de traitement (chaux pour la désulfuration des effluents gazeux), aux engrais pour la biomasse, ainsi qu'à la fabrication de composants spéciaux, telles les cellules photovoltaïques, produit des déchets dont la quantité et la toxicité sont variables selon le procédé d'extraction, les quantités de combustibles ou de minerais nécessaires et la qualité du gisement.

Comme il faut beaucoup de combustible pour obtenir une quantité donnée d'électricité, les mines de charbon produisent généralement le plus de déchets. Mais il existe d'autres sources importantes de déchets: l'extraction de l'uranium/thorium pour la chaîne énergétique nucléaire; plusieurs autres chaînes énergétiques: la chaîne solaire exige plusieurs composés métalliques pour la fabrication de cellules photovoltaïques; les phosphates sont souvent utilisés comme engrais pour la production de biomasse; et de nombreuses matières premières doivent être extraites pour obtenir les matériaux nécessaires à la construction des barrages, des centrales électriques, des véhicules de transport, etc; les eaux souterraines pompées des mines en exploitation ou les eaux qui s'écoulent à travers une mine après sa fermeture, car elles peuvent contenir toute une série de contaminants — y compris des matières radioactives naturelles (thorium, uranium et radium) — des métaux traces (aluminium, mercure, chrome, cadmium, plomb, zinc, arsenic, etc.), ainsi que des sels et des sulfures; et les eaux pompées dans les mines de charbon peuvent contenir beaucoup d'hydrocarbures.

Le gaz naturel est souvent considéré comme une source d'énergie «propre» alors que la prospection et le forage des puits de gaz et de pétrole produisent

de grandes quantités de déchets, dont le tartre radioactif qui se dépose à l'intérieur des canalisations, les boues de forage et les rejets accidentels de pétrole ou les résidus du traitement des eaux contaminées. Le tartre, en particulier, peut contenir d'importantes quantités de radionucléides (*voir le tableau*) et il faut l'évacuer en tant que déchet radioactif. Les boues de forage peuvent être contaminées par des sels, des métaux traces (sélénium, arsenic, magnésium, curium, zinc, chrome, nickel, aluminium et fer), et des huiles et autres lubrifiants. L'extraction du gaz et du pétrole s'accompagne aussi du rejet d'importants volumes d'eau (jusqu'à 3 millions de litres par jour) contenant divers contaminants, dont des produits radioactifs naturels (notamment le radium), des métaux traces, de l'ammoniac, des sels, des hydrocarbures aliphatiques et aromatiques, des phénols et des naphthalènes. Les boues qui se déposent dans les bassins retenant ces eaux contiennent donc de fortes concentrations de métaux, de substances dangereuses et de radionucléides. Le forage produit aussi divers déchets dangereux dont l'amiante, les pesticides, les PCB et le trichloréthylène.

La deuxième étape d'une chaîne énergétique type est la préparation du combustible, importante source de déchets, elle aussi. Pour les combustibles fossiles, elle comprend le tri du charbon brut pour en éliminer les impuretés, le raffinage des produits pétroliers, le traitement des minerais et la fabrication du combustible pour la chaîne nucléaire. Les déchets des activités postminières comprennent les résidus, les eaux et les solides contenant les mêmes contaminants que les rebuts de la mine (métaux traces, sels, métaux et matières radioactives naturelles). Les raffineries rejettent généralement des résidus d'huile et des effluents aqueux, et diverses boues contaminées par des radioéléments naturels, des hydrocarbures, des métaux traces, des PCB et autres substances. La fabrication des combustibles nucléaires produit des déchets contenant des cendres et des boues contaminées par des radioéléments naturels et des métaux traces. La fabrication de cellules photovoltaïques équivaut, *mutatis mutandis*, à la préparation des combustibles et produit de multiples déchets toxiques dangereux contaminés par des composés de l'arsenic, du cuivre, du cadmium, du gallium et du zinc.

La troisième étape de la chaîne énergétique voit apparaître les déchets produits par l'exploitation des centrales électriques. Etant les plus évidents, ils retiennent le plus l'attention. Les centrales au charbon produisent de grandes quantités de déchets de combustion dont les cendres volantes et les cendres lourdes, ainsi que du gypse et des boues de désulfuration contenant toutes de la radioactivité naturelle et des métaux traces. Il est assez paradoxal que la désulfuration visant à réduire les gaz à effet de serre émis par une centrale produise plus de déchets que la combustion ne produit de cendres. Le recyclage des cendres volantes et des résidus de

désulfuration est fortement encouragé et de grandes quantités sont réutilisées (additifs au ciment, remblayage, gypse dans les matériaux de construction, etc.). Même ainsi, d'énormes quantités de cendres et de résidus de désulfuration restent inutilisées; elles sont évaluées à plus de 450 millions de tonnes par an dans le monde. Les centrales au mazout produisent moins de cendres mais éventuellement beaucoup de résidus de désulfuration. En outre, le nettoyage des chaudières et le traitement des effluents aqueux produisent des résidus qui contiennent aussi des matières dangereuses.

Il est probable que ce sont les déchets des centrales nucléaires, notamment le combustible épuisé, dont on s'occupe le plus dans le monde. Pourtant, ces centrales produisent beaucoup moins de déchets que l'ensemble des systèmes de production d'électricité. Le problème, c'est la forte radioactivité de très petites quantités. Le retraitement du combustible épuisé se fait dans plusieurs pays, ce qui réduit le risque à long terme inhérent aux déchets à évacuer. Les centrales nucléaires produisent d'ailleurs des déchets de faible et moyenne activité, tels divers rebuts, tuyauteries et matériel usagé contaminés par des radionucléides de période relativement courte.

Le déclassement des centrales mises à l'arrêt est le dernier maillon de la chaîne énergétique type. Dans les centrales au charbon, au mazout et au gaz, on retire de cette opération des gravats, du matériel usagé et des sols contaminés par les sous-produits de la combustion et autres substances résultant de l'exploitation de la centrale. Quand il s'agit d'une centrale nucléaire, les déchets sont d'une autre nature, car les matières qui se trouvent à proximité du cœur du réacteur ou du circuit primaire exigent éventuellement un traitement spécial, étant fortement contaminées par des radionucléides généralement de courte période. Le déclassement des installations photovoltaïques, des barrages et des éoliennes produit aussi des déchets qu'il faut gérer. Les cellules photovoltaïques, en particulier, contiennent des composés dangereux comportant des risques à long terme pour la santé.

A tous les stades d'une chaîne énergétique, divers déchets résultent d'opérations de construction, de maintenance, de transport et de traitement de déchets. En ce qui concerne la construction, la maintenance et le transport en général, les déchets sont essentiellement de même nature dans toutes les chaînes énergétiques, quoique les quantités, les types et les niveaux de contamination puissent être différents selon la chaîne considérée. Dans le cas des centrales au charbon, par exemple, d'énormes quantités de combustible, de cendres et autres déchets sont à transporter quotidiennement. On a calculé qu'il faut une cinquantaine de camions de 40 tonnes pour emmener chaque jour à la décharge les cendres volantes et les résidus de désulfuration d'une installation type de 1 000 MWe (le rail ou d'autres moyens de transport peuvent également servir, le cas

échéant). Une analyse du cycle complet devrait d'ailleurs porter sur les déchets de la production du combustible nécessaire aux camions ou aux locomotives et sur ceux qu'implique l'entretien de ce matériel. De même, la comparaison doit tenir compte des déchets secondaires résultant du traitement des déchets eux-mêmes.

Matières radioactives naturelles

La plupart des déchets divers dont on vient de parler, notamment ceux de l'extraction et de la préparation du combustible, ainsi que les sous-produits de la combustion, contiennent des radioisotopes naturels (carbone 14, potassium 40, uranium 238, radium 226 et thorium 232) (voir le tableau). Le problème, c'est que ces matières naturelles contiennent des radionucléides de longue période (uranium 238 — période de 4,5 milliards d'années, thorium 232 — période de 14 milliards d'années, et leurs produits de filiation, y compris le radium). Parmi ces isotopes naturels, ce sont le radium et ses descendants qui comportent le plus grand risque radiologique pour la santé.

Comme on se préoccupe surtout des déchets radioactifs des centrales nucléaires, les radionucléides contenus dans les déchets d'autres sources énergétiques ont toujours été relativement sous-estimés. Toutefois, vu les longues périodes des radionucléides naturels que contiennent certains déchets, et les dangers qu'ils comportent, les services de réglementation se sont sentis obligés, depuis peu, de tenir compte des radionucléides présents dans les déchets des chaînes énergétiques non nucléaires, dans le cadre d'une réglementation devenue beaucoup plus stricte.

Pour mieux situer la question, prenons deux exemples de déchets de l'industrie du gaz et du pétrole qui contiennent des radionucléides naturels: 1) Le tartre qui se dépose à l'intérieur des puits et des circuits de production est désormais souvent considéré comme un déchet radioactif et il est intéressant de noter que l'on a montré, dans certains cas, qu'il contient des concentrations de radium 226 qui frisent les niveaux supérieurs internationaux de concentration alpha dans les déchets de faible et moyenne activité enfouis à faible profondeur. 2) L'étude des eaux rejetées en grande quantité par les puits lors des forages dans les gisements de gaz naturel et de pétrole a souligné que 50 à 78 % des puits examinés dans trois Etats des Etats-Unis expulsent de l'eau dont la teneur moyenne en radium est supérieure à 1,85 Bq/l (50 pCi/l). D'autres résultats semblent indiquer des concentrations moyennes de radium dans l'eau de certains puits qui peuvent atteindre 111 Bq/l (3 000 pCi/l). A titre de comparaison, rappelons que la limite de concentration du radium dans les effluents aqueux des centrales nucléaires américaines est fixée à environ 2,2 Bq/l

(60 pCi/l). Bien que des spécifications spéciales puissent être nécessaires dans certains cas, il est clair que les normes de l'industrie nucléaire serviront de référence.

Méthodes d'évacuation des déchets de la production d'électricité

L'Action 21 recommande une production propre mais, jusqu'à ce que l'on dispose de nouvelles techniques, il faut s'attendre que les chaînes énergétiques produisent d'importantes quantités de déchets, de sorte que des méthodes appropriées seront requises. De fait, l'impact final d'une chaîne énergétique sur la santé et l'environnement dépendra dans une certaine mesure de la méthode d'évacuation utilisée. Plusieurs méthodes sont couramment appliquées dans le secteur de la production d'électricité. En voici un bref aperçu.

Aux stades de l'extraction et de la préparation du combustible, les grandes quantités de déchets n'exigent pas d'installations compliquées pour leur évacuation. Dans certains cas, les stériles servent à remblayer les excavations de la mine ou sont étalés en surface. Mais il n'est pas rare, désormais, de les recouvrir s'ils sont dangereux, afin d'éviter l'infiltration. Les déchets du forage des puits de gaz ou de pétrole sont normalement réinjectés dans la formation, enfouis dans des fosses ou étalés en surface sur le site même.

Les déchets de la préparation du combustible pour les chaînes énergétiques au charbon et nucléaires contiennent de grands volumes de liquides évacués dans des bassins artificiels étanches. Les déchets solides (schlamm et résidus d'évaporation) sont recouverts d'une couche de terre aménagée pour réduire au minimum l'infiltration et limiter le dégagement de gaz. Les déchets de raffinage du pétrole sont épandus sur le sol ou évacués dans des fosses. Les déchets dangereux des raffineries ou de la fabrication des cellules photovoltaïques sont emmenés dans un dépôt autorisé. Ce genre d'installation comporte des tranchées étanchéifiées munies d'un réseau collecteur de lixiviat et d'une couverture de terre aménagée pour limiter la pénétration de l'eau. Les autres déchets de la préparation des combustibles sont mis en décharge ou, dans le cas de certains déchets nucléaires, placés dans des tranchées aménagées ou dans des casemates en béton.

Les déchets d'exploitation des centrales au charbon et au mazout (cendres volantes et résidus de désulfuration) sont évacués dans des bassins, des décharges et des cavités de mines, ou encore entassés en surface. Après évaporation et vidange de l'eau, les dépôts de boues au fond des bassins d'évacuation sont recouverts de terre. En revanche, les déchets liquides du nettoyage des chaudières à charbon, à gaz et à mazout doivent parfois être traités comme déchets dangereux, ce qui implique leur évacuation

dans un dépôt agréé. Les déchets de faible et moyenne activité des centrales nucléaires sont évacués dans des tranchées aménagées, des casemates en béton ou des cavités souterraines, après un emballage préalable. Les déchets de haute activité, dont le combustible épuisé, sont destinés à être évacués dans des formations géologiques profondes ou stockés sous une forme récupérable.

Orientations futures

L'Action 21 adoptée par la CNUED précise que la réduction de la quantité de déchets des activités humaines est un élément critique de la stratégie du développement durable de la société. La production d'électricité, si nécessaire au développement, est une source de déchets qu'il est indispensable de limiter. Pour évaluer le rôle potentiel de l'option nucléaire dans une stratégie mondiale visant une production propre et un développement durable, l'AIEA a lancé un projet sur les effets sanitaires et écologiques comparés des déchets solides des systèmes énergétiques.

Les tâches consistent à déterminer les quantités et les types de déchets des options de production d'électricité et à préciser leur mode d'évacuation; à étudier et à tester les méthodes utilisables pour comparer les effets sanitaires et écologiques potentiels de l'évacuation de ces déchets dus, par exemple, au dégagement et au transport dans l'environnement de leurs composants radioactifs et non radioactifs; et à examiner les autres évaluations comparatives qui ont été faites. Les méthodes de comparaison des effets sanitaires et écologiques des radionucléides et des éléments ou composés non radioactifs toxiques ainsi que la modélisation de leur transport et de leur destination dans l'environnement, sous terre et en surface, seront un volet essentiel de l'évaluation comparative.

Nous avons brièvement présenté dans cet article les données acquises à ce jour pour la première partie du projet, donné une idée de la nature et de la masse des déchets de l'option nucléaire et des autres chaînes énergétiques, et montré que les déchets du nucléaire n'étaient qu'une petite fraction de tous les déchets produits et de ceux de la production d'électricité. Ce fait milite en faveur de l'énergie nucléaire dans le contexte d'une production propre et d'une stratégie de développement durable de la société.

Nous avons aussi souligné qu'il importait de tenir compte de tous les stades des chaînes énergétiques, dont l'examen détaillé précise que même celles d'entre elles qui sont réputées «propres» (énergie solaire et gaz naturel) produisent en fait des déchets (composés métalliques dangereux pour la première, et déchets radioactifs et dangereux du forage et des circuits pour la seconde) impliquant des risques potentiels à long terme pour la santé et l'environ-

nement. De même, les grandes quantités de déchets de certaines chaînes énergétiques (cendres volantes et déchets de désulfuration des fumées) posent des problèmes d'évacuation.

Les prochains travaux consisteront à définir et à quantifier de façon plus précise les déchets et les méthodes d'évacuation qui caractérisent les chaînes énergétiques actuelles, à examiner et à tester les méthodes de modélisation du transport et de la destination des contaminants contenus dans ces déchets, et à calculer l'impact sanitaire et écologique qui en résulte.