

# Énergie ET Sécurité

NO. 14 2001 UNE PUBLICATION DE L'IEER

## De graves carences dans les dossiers médicaux des travailleurs



Un travailleur de l'usine de plutonium de Hanford dans l'Etat de Washington est soumis à un contrôle de l'organisme entier en vue de détecter une possible contamination radioactive.

PAR ARJUN MAKHIJANI  
ET BERND FRANKE

Dans le cadre de son engagement dans la production et l'expérimentation d'armes nucléaires, le ministère de l'Énergie des États-Unis (DOE) et les agences gouvernementales qui l'ont précédé, la Commission de l'Énergie Atomique (AEC), de 1947 à 1974, et l'Agence pour la Recherche et le Développement de l'Énergie (ERDA), de 1974 à 1977, devaient s'assurer que les travailleurs n'étaient pas exposés à des quantités d'irradiation supérieures à celles autorisées. Le DOE se devait également de suivre ce que l'on appelle le " principe ALARA "—l'idée selon laquelle l'exposition aux rayonnements doit être maintenue " au niveau le plus bas que l'on peut raisonnablement atteindre " (en anglais, 'As Low As Reasonably Achievable') en utilisant la technologie disponible.

L'objectif de la mise en place de limitations de doses et du respect du principe ALARA est de protéger la santé des travailleurs en limitant leur exposition. Mais si cette exposition n'est pas correctement mesurée, les réglementations concernant l'exposition aux rayonnements ne peuvent être mises en application, et les directives ne peuvent être respectées. Le personnel responsable du contrôle de la santé des travailleurs peut, dans certains cas, ne pas être informé de circonstances qui aboutissent à une surexposition des travailleurs. Des maladies que les travailleurs sont davantage susceptibles de

LIRE LA SUITE PAGE 4  
VOIR LA PAGE 16 POUR LES ANNOTATIONS

### EDITORIAL

## Une commission mondiale pour la vérité sur les dommages causés par la production des armes nucléaires sur la santé et l'environnement

PAR ARJUN MAKHIJANI

Des études poussées menées au cours des vingt dernières années ont montré que les États dotés d'armes nucléaires ont, au nom de la sécurité nationale, surtout causé du tort à leur propre population sans que celle-ci soit dûment informée.<sup>1</sup> Les travailleurs employés à la production des armes nucléaires ont été les premiers à être exposés à cette face cachée de la guerre froide que les États nucléaires ont menée contre leur propre peuple. Mais on est encore loin de connaître ou de comprendre réellement la façon dont a été menée cette attaque lente sur la santé et l'environnement. Au cours des vingt dernières années, la prise de conscience de l'ampleur des dégâts n'a commencé à émerger d'un brouillard de démentis et de

LIRE LA SUITE PAGE 2  
VOIR LA PAGE 3 POUR LES ANNOTATIONS

### DANS CE NUMÉRO

Mesurer les rayonnements ionisants : terminologie et unités .....	8
Mesurer la radioactivité : instruments et méthodes .....	11
Cher Arjun .....	15

**UNE COMMISSION MONDIALE** SUITE DE LA PAGE 1  
propagande que dans une seule puissance nucléaire : les Etats-Unis.

Les rapports américains qui ont jusqu'ici été rendus publics sont loin d'être rassurants. On y trouve entre autres une priorité délibérément accordée à la production au mépris de la protection de la santé, des violations systématiques et à grande échelle des règles de santé et de sécurité, des informations visant délibérément à tromper les travailleurs afin de ne pas réveiller leur inquiétude ou de ne pas leur accorder d'indemnités pour des tâches dangereuses alors que les deux étaient largement justifiés, ainsi qu'un détournement du processus démocratique.

Une pratique scientifique bâclée et incompétente était monnaie courante dans ce contexte lamentable. Comme l'article associé à cet éditorial le montre, le ministère de l'Energie des Etats-Unis a admis que, jusqu'en 1989, aucun effort n'a été fait pour calculer les doses d'irradiation interne reçues par les travailleurs, causées par l'inhalation ou l'ingestion de matières radioactives. Le travail mené par l'IEER à partir des données du site de Fernald, près de Cincinnati, en Ohio, qui a servi au traitement de l'uranium pour les réacteurs plutonigènes, a montré qu'au cours des années 1950 et au début des années 1960, la plupart des travailleurs avaient en fait été surexposés à cause de l'inhalation d'uranium. Nombre de ceux-ci ont sans doute aussi souffert de dommages causés aux reins, à cause de la toxicité de l'uranium en tant que métal lourd. Pourtant, on les a rassurés, on leur a dit qu'ils ne couraient aucun danger.

Au fur et à mesure que ces informations ont été rendues publiques, des voix se sont élevées pour demander la réparation des injustices, la révélation de toutes les informations au public, mais aussi des soins médicaux et des indemnités. Récemment les Etats-Unis ont passé une loi qui donne le droit à presque tous les travailleurs de l'industrie nucléaire de faire une demande pour dédommagements et soins médicaux dans l'éventualité où ils contracteraient certaines maladies. A ce jour, aucun autre gouvernement n'a admis de façon aussi générale que les rayonnements puissent avoir un effet néfaste quoiqu'il existe dans certains endroits quelques modestes programmes visant un nombre limité de personnes. Les données brutes concernant les doses aux travailleurs et les conditions de travail (respectant le droit au secret des travailleurs) sont, pour la plupart toujours gardées secrètes. Bien que la Russie soit plus ouverte depuis le début des années 1980, et que l'on commence à voir émerger quelques données sur les expositions des travailleurs, presque aucune donnée brute n'est accessible aux chercheurs russes indépendants. Le secret a toujours son emprise sur les autres pays relativement ouverts - la France, l'Inde et la Grande-Bretagne. La situation en Chine, au Pakistan et en Israël est bien pire.

L'attitude consistant à garder secrètes les atteintes à la santé et à l'environnement de leur propre peuple au nom de la sécurité nationale, est fondamentalement antidémocratique. Elle présuppose que la population ne ferait pas de sacrifices pour la sécurité de leurs pays. Elle présuppose que les bureaucrates du nucléaire les plus haut placés peuvent prendre des décisions de vie ou de mort en violation des lois, des normes et des réglementations établies, sans le consentement éclairé de la population.

Les préjudices causés se sont étendus bien au-delà des limites des usines jusqu'aux familles des travailleurs, aux riverains et au grand public. Pour donner un exemple, une étude officielle menée par le l'Institut National contre le Cancer des Etats-Unis montre que, pendant les années 1950, une grande partie de l'approvisionnement en lait aux Etats-Unis a été contaminée par l'iode 131 provenant des retombées d'essais nucléaires atmosphériques menés sur le Site d'Essais du Nevada.<sup>2</sup> Aucun autre Etat nucléaire ne s'est jamais

LIRE LA SUITE PAGE 3

## Énergie & Sécurité

*Énergie et Sécurité* est un bulletin sur la non-prolifération, le désarmement et les énergies durables. Il est publié quatre fois par an par:

L'Institut pour la Recherche sur l'Énergie et l'Environnement (IEER)

IEER fournit au public et aux décideurs politiques des études techniques claires et scientifiquement solides dans un grand nombre de domaines. L'objectif de l'IEER est d'apporter une analyse scientifique d'excellente qualité aux questions politiques touchant le public tout en favorisant la démocratisation de la science et un environnement plus sain.

### Crédits pour ce numéro

Traduction: Annike Thierry

avec la collaboration de: Jean-Luc Thierry et Annie Makhijani

Mise en page: Cutting Edge Graphics, Washington D.C.

*Énergie et Sécurité* est gratuit pour tous.

Rédactrice en chef: Lisa Ledwidge

La version anglaise de ce numéro a été publiée en septembre 2000.

### Merci à ceux qui nous soutiennent

Nous remercions sincèrement les institutions dont le généreux soutien financier a rendu possible notre projet mondial sur «les dangers des matières nucléaires.»

• W. Alton Jones Foundation •  
John D. And Catherine T. MacArthur Foundation • C.S. Fund •  
HKH Foundation • New Land Foundation •

Nous remercions également les institutions qui financent notre projet d'aide technique pour les organisations militantes. Nous nous inspirons beaucoup de ce projet pour notre projet mondial.

• Public Welfare Foundation • John Merck Fund •  
Ploughshares Fund • Unitarian Universalist Veatch Program at  
Shelter Rock • Rockefeller Financial Services • Stewart R. Mott  
Charitable Trust • Town Creek Foundation • Beldon II Fund  
• DJB Foundation •

donné la peine de s'engager dans un tel effort visant à répondre de ses actes devant son propre public. De surcroît, les essais atmosphériques menés par les Etats dotés d'armes nucléaires ont contaminé l'approvisionnement en lait bien au-delà de leurs frontières. Il est intéressant de remarquer qu'alors que l'Institut National contre le Cancer des Etats-Unis a publié des cartes de la contamination du lait aux Etats-Unis, ces cartes s'arrêtent comme par magie aux frontières du Canada et du Mexique. Les Etats dotés d'armes nucléaires ont porté atteinte à la santé de mineurs d'uranium. Les sites d'essais nucléaires ont contaminé des régions appartenant aux anciennes colonies, comme l'Algérie et la Polynésie des Etats non-nucléaires. Cependant aucune comptabilité n'en a encore été dressée. Mais pourquoi les Etats dotés d'armes nucléaires seraient-ils responsables de leurs actes devant des populations se trouvant au-delà de leurs frontières alors qu'ils n'ont même pas été capables d'en répondre devant leur propre peuple ?

Les dommages infligés délibérément aux travailleurs et plus généralement au public soulèvent des questions troublantes quant à la façon dont est formulée la politique de sécurité nationale dans la sphère nucléaire. Si l'establishment nucléaire militaire peut délibérément choisir de porter atteinte précisément aux personnes qu'il affirme vouloir protéger, ceci sans chercher à les informer, alors comment peut-on être sûr que les politiques de sécurité elles-mêmes ne sont pas motivées, en grande partie, par un instinct de conservation bureaucratique plutôt que par les intérêts de sécurité et de santé de la communauté dans sa globalité ? Il ne s'agit en aucun cas ici d'une question rhétorique ou théorique. Il existe même des témoignages manifestes qui indiquent que la décision de bombarder Hiroshima et Nagasaki a été en partie motivée par le désir de justifier les énormes dépenses faites pour les bombes nucléaires pendant le projet Manhattan. L'establishment nucléaire craignait que des enquêtes impitoyables ne soient menées après la guerre sur le gaspillage financier si l'on ne montrait pas à quel point les bombes étaient d'une importance majeure pour l'effort de guerre.<sup>3</sup> De telles enquêtes auraient, sans aucun doute, également terni les perspectives d'une continuation de budgets importants pour les armes nucléaires après la guerre.

Un débat public de grande envergure est nécessaire dans chaque Etat doté d'armes nucléaires sur les dommages qu'ils ont infligés à la santé et à l'environnement de leur propre population. Il est nécessaire qu'un

### Des déclarations inexactes et trompeuses et la bravade technologique de l'énergie nucléaire devinrent bientôt parties intégrantes de l'hystérie de la guerre froide qui domina le pays.

débat mondial soit mené sur les dommages causés en dehors des frontières de ces Etats. Une bonne partie de ceux-ci ont également été infligés en connaissance de cause. Par exemple, un éditorial publié en 1960 dans le magazine des anciens élèves du département d'Ingénierie de l'Université de Californie faisait remarquer que "les essais nucléaires ont jusqu'ici provoqué [au niveau mondial] 6000 cas supplémentaires de bébés présentant des malformations majeures à la naissance". Pourtant, il ajoutait : "il faut replacer ce risque reconnu dans le

contexte du besoin démontré d'un arsenal nucléaire pour les Etats-Unis."<sup>4</sup> L'éditorial n'expliquait pas pourquoi les enfants du Nigeria, de Costa Rica ou d'Indonésie auraient à souffrir de malformations majeures à la naissance afin que les Etats-Unis puissent avoir un arsenal nucléaire.

Il est grand temps que les Nations unies établissent une Commission pour obtenir la vérité

sur les ravages infligés au niveau mondial par la production et l'expérimentation des armes nucléaires. Une telle commission devrait non seulement étudier la nature et l'étendue de ces dommages, et la façon dont ils ont ou non été commis délibérément; mais elle devrait recommander la façon dont les populations mondiales devraient forcer les establishments nucléaires à répondre de leurs actes. Elle devrait également étudier si, et dans quelle mesure, les arguments relevant de la sécurité qui ont été brandis en faveur des armes nucléaires ont été construits avec pour objectif de maintenir les populations ignorantes et craintives afin que les bureaucraties nucléaires militaires puissent se perpétuer. Une telle étude serait aujourd'hui particulièrement importante, étant donné que les establishments nucléaires refusent toujours de respecter leurs engagements de désarmement pris dans le cadre du Traité de Non-Prolifération Nucléaire, et que des populations continuent à tomber malades et à mourir à cause des torts qui leur ont été causés par les establishments des armes nucléaires.

1 Arjun Makhijani, Howard Hu, et Katherine Yih, eds. *Nuclear Wastelands: A Global Guide to Nuclear Weapons Production and Its Health and Environmental Effects*. Cambridge, Mass.: MIT Press, 1995.

2 Pat Ortmeier, "Let Them Drink Milk," *Science for Democratic Action*, vol. 6, no. 2

3 Leslie Groves, *Now it Can Be Told: The Story of the Manhattan Project*. New York: Harper and Row, 1962, Chapitre 26. David Robertson, *Sly and Able: A Political Biography of James F. Byrnes*. New York: Norton, 1994, Chapitre 15. Voir aussi Arjun Makhijani, "Japan: Always the Target?", *Bulletin of the Atomic Scientists*, mai-juin 1995.

4 Editorial du *California Engineer* du mois d'avril 1960, publié à nouveau dans le *California Engineer* en 1990.

contracter pourraient ne pas être détectées, leur portant atteinte ainsi qu'à leurs familles. Des études sur la santé basées sur les chiffres des doses reçues par les travailleurs aboutiraient donc à des résultats trompeurs, puisque les rapports concernant les doses seraient incomplets et la connaissance des doses inexacte.

Depuis le début de l'ère nucléaire et jusqu'en 1989, les doses d'irradiation provenant des matières radioactives inhalées ou ingérées par les travailleurs n'étaient ni calculées ni prises en compte dans les dossiers concernant les doses aux travailleurs. Cette information a été révélée par le DOE dans un document de référence envoyé à l'IEER le 7 avril 1997.<sup>1</sup> Le DOE et les agences gouvernementales qui l'ont précédé ont pourtant effectué des mesures de l'exposition interne aux matières radioactives, bien que ces mesures aient été sporadiques (voir ci-dessous), pour l'essentiel en prélevant des échantillons d'urine. Durant la deuxième moitié des années soixante, des instruments sophistiqués ont parfois été utilisés, afin de mesurer directement les radionucléides présents dans le corps des travailleurs. Aucune réglementation n'imposait au DOE de calculer les doses aux travailleurs, mais il avait obligation de garder les comptes rendus permettant de savoir si les travailleurs avaient ou non été exposés à des quantités de radionucléides supérieures aux seuils fixés.

L'absence de données anciennes concernant les doses internes dans les dossiers médicaux des travailleurs a des conséquences importantes pour la politique publique liée aux problèmes de santé, pour les enquêtes scientifiques sur le risque dû aux irradiations, et par dessus tout pour plus d'un demi million de travailleurs et leurs familles, qui ont été impliqués dans la fabrication et l'expérimentation de têtes nucléaires américaines depuis le projet Manhattan. En 1989, le DOE a commencé à corriger ce problème historique en initiant un programme d'intégration des doses internes et externes des travailleurs.

### Seuils d'exposition

Les seuils d'exposition autorisée ont varié au cours des années, et ont généralement eu tendance à décroître au fur et à mesure des connaissances acquises sur les risques de cancers induits par les irradiations, indiquant que les risques encourus étaient plus grands que ce que l'on avait pensé jusque là. Afin de garantir que les travailleurs ne sont pas surexposés, les voies d'exposition les plus importantes doivent être correctement contrôlées. Il faut aussi prendre en compte du fait que chaque individu réagit de façon différente aux rayonnements ionisants.

Lorsqu'il y a seulement irradiation externe, la mesure des doses aux travailleurs est effectuée par l'utilisation de dosimètres photographiques personnels, (c'est-à-dire des petites plaques photographiques qui

sont sensibles aux rayonnements bêta et gamma), ou des dosimètres thermoluminescents, (appareils réutilisables qui mesurent les rayonnements gamma externes). Ces appareils peuvent mesurer la quantité d'irradiation à laquelle un travailleur a été exposé, mais sont incapables de mesurer la quantité d'irradiation qui a pu être pénétrer dans le corps par inhalation, ingestion ou par d'autres voies.

Une exposition à une irradiation interne se produit lorsque les matières radioactives pénètrent à l'intérieur du corps et décroissent, irradiant par conséquent les tissus situés à proximité. L'irradiation interne affecte plus souvent un seul type d'organe que l'irradiation externe. Si les radionucléides se logent dans des parties précises du corps, telles que les poumons ou les os, par exemple, ces régions du corps sont largement plus irradiées que les autres. Le risque d'exposition interne est élevé dans les lieux de travail où l'air devient contaminé par des matières ou des poussières radioactives, ce qui s'est souvent produit dans diverses sortes d'usines de traitement de l'uranium et dans les mines d'uranium. Les travailleurs peuvent également être exposés à des irradiations internes par l'intermédiaire de l'ingestion de matières radioactives (si les matières radioactives présentes dans l'air pénètrent dans la bouche, par exemple) ou par l'absorption de matières à travers d'éventuelles plaies ou coupures.

Une exposition interne est moins probable dans des situations où les matières radioactives sont scellées ou séparées d'une manière quelconque de l'environnement de travail, comme par exemple dans des boîtes à gants. Pourtant, si des accidents se produisent dans ces situations, ou si des équipements tels que le système de ventilation ou la boîte à gants ne sont pas efficaces ou ne fonctionnent pas correctement, alors les travailleurs peuvent là aussi être exposés à une irradiation interne.

Pendant la quasi-totalité de la période pendant laquelle les armes nucléaires ont été fabriquées, des seuils ont été imposés pour l'exposition aux irradiations à la fois par voie interne et externe. Certains seuils actuels s'appliquent à la fois à l'exposition externe et interne, alors que les seuils utilisés par le passé s'appliquaient spécifiquement à des organes particuliers, tels que les poumons. Par exemple, le seuil fixé pour l'exposition des poumons jusqu'en 1958 était de 15 rem par an pour les travailleurs et les populations vivant à proximité des sites. Ce seuil est passé à 1,5 rem par an en 1959 pour les populations vivant à proximité des sites.

### Le contrôle des doses

Les doses internes sont contrôlées de diverses façons. Une méthode utilisée habituellement est de mesurer les concentrations en radio nucléides dans les urines. Si l'on connaît les taux d'excrétion correspondants à diverses charges corporelles, alors il est possible de

LIRE LA SUITE PAGE 5

calculer ces charges corporelles et par conséquent d'en déduire la dose d'irradiation.

Une autre méthode utilisée consiste à mesurer les rayonnements gamma émis par le radio nucléide présent dans le corps humain. Etant donné qu'une partie du rayonnement gamma pénètre à l'intérieur du corps humain, une fraction des rayonnements gamma émis par les radionucléides présents dans le corps humain s'en échappe. On mesure ces rayonnements en plaçant le travailleur ou bien une partie de son corps dans un " compteur ", qui est une chambre qui mesure l'irradiation gamma. Il y a ainsi des " compteurs pour le corps entier ", des " compteurs pour les poumons ", etc... Il faut alors faire attention d'exclure les autres sources de radioactivité émise par l'environnement ou d'ajuster les résultats en fonction de celles-ci lors de la mesure des charges corporelles internes, notamment le radon et ses produits de filiation.

Les doses internes peuvent également être estimées indirectement par la mesure des concentrations de radionucléides présents dans l'air à l'intérieur de l'usine. Dans les lieux où l'exposition est la plus probable, les travailleurs peuvent porter des appareils portatifs de contrôle de l'air afin de mesurer les concentrations de radionucléides contenus dans la " zone de respiration " - c'est-à-dire, dans l'air qui est très près de leurs visages. Les doses internes aux travailleurs peuvent être estimées si l'on connaît à la fois la fréquence de respiration, l'efficacité des appareils de protection portés par les travailleurs (dans le cas où il y en a), ainsi que d'autres facteurs de ce genre.

Il est essentiel que ce contrôle de l'irradiation soit mené correctement et avec suffisamment de précision. Les dosimètres photographiques personnels et les dosimètres thermoluminescents doivent par exemple être stockés correctement lorsqu'ils ne sont pas utilisés, afin qu'ils ne soient pas contaminés entre les temps d'exposition des travailleurs. De la même façon, les travailleurs courant des risques d'exposition interne doivent être contrôlés de façon suffisamment fréquente pour que l'on puisse chiffrer avec précision les charges corporelles de radionucléides internes. Ceci est nécessaire parce que le corps élimine les radionucléides au cours du temps. Certains sont éliminés par le corps en un temps très court, alors que d'autres sont rejetés très lentement. (Le temps nécessaire pour l'élimination de la moitié de la charge corporelle d'un radionucléide est appelé sa demi-vie biologique). Il est également important de connaître la forme chimique du radionucléide inhalé ou ingéré parce que la vitesse à laquelle il est éliminé du corps humain dépend de la solubilité de ce composé chimique précis.

### Le fiasco des contrôles

Le 7 avril 1997, un document de référence envoyé à l'IEER par le bureau du DOE pour les programmes de

protection des travailleurs et la gestion des risques (*Office of Worker Protection Programs and Hazards Management*) a clairement exposé ce que l'IEER suspectait depuis plusieurs années :

" (...) jusqu'en 1989 au DOE, et entre 1991 et 1994 dans l'industrie nucléaire (la NRC (*Nuclear Regulatory Commission*) et les *Agreement States* (Etats liés par un accord)), les doses de radiation internes n'ont pas été calculées pour les travailleurs. La radioactivité présente dans les excréments ou le pourcentage de charges corporelles étaient enregistrés auprès du DOE avant 1989. "

Ainsi, alors que l'on contrôlait les charges corporelles des travailleurs, elles n'étaient pas utilisées pour le calcul des estimations de doses d'irradiation. De la même façon, aucune estimation de dose d'irradiation correspondant aux charges corporelles internes de radionucléides n'a été enregistrée dans les comptes-rendus des doses aux travailleurs.

Bien qu'il n'existait aucune obligation réglementaire à calculer les doses aux travailleurs, l'absence d'estimations de doses d'irradiation interne dans les comptes-rendus des doses des travailleurs signifie que les archives concernant les travailleurs qui encouraient des risques d'exposition interne sont à la fois incomplètes, trompeuses et inexacts. Le caractère lacunaire et inexact des chiffres est donc différent pour chaque travailleur, pour chaque période, mais aussi pour chaque site. Mais le résultat global est que de très nombreux travailleurs ont reçu des informations concernant leur exposition aux rayonnements qui ont systématiquement sous-estimé les expositions réelles.

Une autre conséquence de ces inventaires de doses internes incomplets réalisés avant 1989 est que, lors de procès pour indemnisations demandées par des travailleurs pour des cas d'expositions internes, il est possible que le DOE et ses partenaires aient basé leur argumentaire sur des données incomplètes qui sous-estimaient les expositions des travailleurs impliqués. De nombreux procès ont peut-être par conséquent été injustement perdus par les travailleurs. Que le DOE ou les agences gouvernementales qui l'ont précédé, aient ou non délibérément omis de donner les informations concernant les doses internes lors de certains procès pour indemnisation de travailleurs, est à l'heure actuelle une question qui reste ouverte, mais semble tout à fait justifiée.

Bien qu'il ne soit pas possible de donner une estimation précise de la proportion des 500 000 à 600 000 travailleurs qui ont travaillé pour le DOE qui encouraient un risque d'exposition supérieur aux seuils autorisés, nous pouvons citer comme exemple l'usine de traitement de l'uranium de l'Ohio connue sous le nom

LIRE LA SUITE PAGE 6

d'usine Fernald, où la plupart des travailleurs ont encouru des risques au cours des premières années de son exploitation. En fait, pour 1955, l'année où les travailleurs ont été le plus exposés, l'IEER estime que près de 90% des travailleurs étaient exposés à des doses supérieures au seuil autorisé de 15 rem pour les poumons. (Voir SDA Vol.5 No.3)

Les inventaires de doses largement incomplets ont également de nombreuses autres conséquences directes :

- Les expositions internes des travailleurs à l'uranium peuvent également avoir abouti dans certains cas à des empoisonnements en métaux lourds, notamment des reins. De tels cas auraient pu être mieux détectés si les inventaires de doses avaient également inclus des informations sur les doses internes.
- Des diagnostics médicaux ont pu être faux parce que les inventaires de doses étaient incomplets.
- Des mesures de correction visant à améliorer les conditions de travail ont probablement été retardées ou n'ont pas été mises en vigueur dans de nombreux cas parce que les inventaires de doses ne révélaient pas de surexpositions.

Ce problème a connu sa période la plus grave avant le milieu et la fin des années 1960, et ce pour deux raisons. La première, c'est que des preuves indiquent qu'il s'agit de la période pendant laquelle l'environnement de travail était le plus sale et les travailleurs couraient le plus grand risque d'exposition. Cette observation ne peut être utilisée pour aboutir à des conclusions concernant des travailleurs individuels ou même des installations nucléaires spécifiques. Mais, jusqu'à présent, la plupart des éléments que nous avons examinés indiquent pour diverses raisons, que les expositions étaient les plus élevées durant cette période.

Deuxièmement, cette période est celle qui a précédé l'accession à des techniques de comptage permettant des mesures directes des charges corporelles. Des seuils d'intervention ont alors été établis pour les radio nucléides présents dans les urines. Tant que le contenu de radio nucléides spécifiques était inférieur à ces seuils d'intervention, les charges corporelles et les doses aux travailleurs étaient considérées comme étant inférieures aux seuils réglementaires. Après la création de compteurs spécifiques pour les poumons et le corps humain vers le début des années 1960, il y eut du retard avant qu'ils ne soient réellement utilisés. Et même après leur mise en place, par exemple en 1968 sur le site de Fernald, ce sont les mesures prises dans les urines qui ont continué à être la méthode principale de contrôle des doses internes.

Malheureusement, la procédure de contrôle adoptée par le DOE et ses partenaires présentait différents

points faibles. L'analyse de l'IEER des archives de dose de Fernald en 1985 ont révélé les problèmes suivants :

- La charge corporelle aux poumons déduite des données concernant les urines a systématiquement été sous-estimée à cause des hypothèses erronées sur le rapport de l'excrétion d'urines par unité d'uranium logée dans les tissus pulmonaires.
- Le contrôle des urines n'a pas été réalisé pour tous les radio nucléides.
- Le contrôle des urines était en général réalisé trop peu souvent pour qu'il permette un calcul précis des charges corporelles et de leurs évolutions au cours du temps. Étant donné que de nombreuses formes chimiques de radio nucléides sont excrétées de façon relativement rapide, il est probable qu'un contrôle peu fréquent ait fait l'impasse sur des doses provenant d'accidents ou d'autres expositions occasionnelles et néanmoins élevées. De plus, dans de nombreux cas, les mesures sur les urines étaient effectuées si peu souvent que même des formes chimiques ayant des demi-vie biologiques relativement longues n'auraient pas été détectées correctement. En conséquence, des concentrations faibles dans les urines pourraient ne pas avoir correspondu à des expositions à des faibles niveaux de rayonnement, mais simplement à une durée de temps très longue entre l'incorporation du radio nucléide et le prélèvement d'échantillons d'urine (ou le comptage au niveau des poumons).
- La solubilité du composé inhalé ou ingéré n'a pas été calculée ou, dans le cas où elle était connue, n'a pas été prise en compte.
- La relation entre le moment du prélèvement de l'urine et l'exposition était, dans la plupart des cas, inconnu.

En conséquence de tous ces facteurs, l'hypothèse selon laquelle la dose était inférieure aux seuils réglementaires si la concentration en un radio nucléide présent dans l'urine était inférieure au niveau d'action, était incohérente du point de vue scientifique. Même lorsque les doses réelles étaient inférieures aux seuils réglementaires, les doses internes auraient dû être prises en compte dans les dossiers médicaux des travailleurs, et ajoutées aux doses externes de façon appropriée.

### **Les doses au corps entier et à des organes spécifiques**

Les normes pour les rayonnements limitent les doses à la fois à des organes spécifiques et au corps humain entier. Pour donner un exemple, citons les doses au poumon. Le poumon peut être exposé au rayonnement gamma externe provenant de sources extérieures au corps humain, qui aboutissent à des doses pour l'essen-

LIRE LA SUITE PAGE 7

tiel égales à celles des autres organes du corps humain. Il peut également être exposé à des radionucléides inhalés. Afin de garantir le respect de la limite de dose pour les poumons, qui était de 15 rem dans les années 1950 et jusque dans les années 1980, le DOE et ses partenaires devaient seulement étudier les charges corporelles internes des radionucléides. (Pourtant, comme nous l'avons indiqué, les doses internes n'étaient pas calculées avant 1989 à partir de ces données). Dans la plupart des cas, comme par exemple pour le site de Fernald, les doses aux poumons ont été déduites à partir des mesures de l'uranium présent dans les urines. Si l'on trouvait celles-ci inférieures aux limites de concentrations réglementaires, on considérerait alors avoir démontré que la limite annuelle de 15 rem était respectée.

Pendant la période qui a suivi la fin des années 1980, la pratique réglementaire a consisté à utiliser des "équivalents de doses efficaces engagées."<sup>2</sup> Selon ce modèle, la "dose efficace" est calculée en multipliant les doses aux organes ou tissus individuels, comme la thyroïde, les tissus osseux ou le poumon, par un facteur de pondération qui permet la prise en compte de la probabilité relative de mortalité par cancer due à l'exposition d'un organe particulier. Cela permet de calculer en même temps l'exposition d'un organe particulier et celle du corps entier. De plus, les doses aux organes internes sont calculées sur la base d'une dose "engagée" sur cinquante ans - c'est-à-dire la dose totale d'un radio nucléide pour un organe sur une période de cinquante ans (dans la plupart des cas, l'essentiel de la dose est reçu en quelques années ou moins). Ces deux concepts, "l'équivalent de dose efficace" et "la dose engagée", sont rassemblés afin d'obtenir un "équivalent de dose efficace engagée". Afin de faciliter la réglementation, la dose engagée entière est attribuée à l'année lors de laquelle le radio nucléide a été incorporé dans le corps. Mais même dans le cas de cette nouvelle pratique, les doses aux organes causées par l'irradiation interne doivent être connues, parce que sans ces données, l'équivalent de dose efficace correct ne peut être calculé. Cette transformation des réglementations, en nécessitant le calcul des équivalents de dose efficace, a poussé le DOE à se réorienter sur une politique d'intégration des doses d'irradiation internes et externes.

Alors que l'absence de techniques scientifiques précises avant le milieu des années 1960 aurait rendu impossible une évaluation exacte des doses internes, ces doses auraient pu être déduites des données concernant les urines, puis intégrées aux dossiers médicaux, mais cela ne fut pas le cas. Après le milieu des années 1960, l'AEC et ses sous-traitants auraient pu réaliser des estimations relativement précises des doses aux travailleurs, mais ils ont négligé de le faire. Il semblerait

que l'approche institutionnelle qui a placé la production des armements en priorité par rapport à la protection de l'environnement a également prévalu pour reléguer au second plan un enregistrement cohérent des doses aux travailleurs jusqu'à la fin des tensions de la guerre froide.

### Conséquences de la sous-estimation des doses

La sous-estimation des doses internes n'est pas simplement la preuve des mauvaises pratiques en vigueur pour la protection de la santé des travailleurs. Elle crée en plus des problèmes pour les études épidémiologiques. Des études épidémiologiques exactes sont nécessaires afin d'estimer le risque sanitaire lié à l'exposition aux rayonnements, et cela nécessite que des études soient menées avec des données cohérentes concernant les doses à divers groupes de travailleurs.

Les études de cohorte, par exemple, comparent l'état de santé de personnes avec différents degrés d'exposition. De telles études sont couramment menées parmi les populations de travailleurs et aident à évaluer le risque d'exposition aux rayonnements (ou aux autres agents susceptibles d'engendrer des maladies). Mais si les dossiers médicaux des travailleurs sont faussés par l'omission d'un composant de dose essentiel, les travailleurs ayant subi des expositions élevées et les travailleurs ayant été soumis à de faibles expositions pourraient se retrouver pêle-mêle rendant impossible tout contrôle statistique.

Par exemple, des études menées seulement sur l'exposition externe regrouperaient les travailleurs ayant des doses internes faibles dans un groupe, et ceux ayant des doses externes élevées dans un autre. Si une partie, ou la totalité du groupe des travailleurs ayant subi une exposition externe faible avaient eu des doses internes supérieures au groupe ayant subi des expositions externes élevées, l'étude en viendrait à comparer des travailleurs ayant eu des expositions élevées à d'autres travailleurs ayant également subi des expositions élevées!<sup>3</sup> Une telle étude serait donc trompeuse, et tendrait à sous-estimer les risques. Au contraire, si le groupe ayant eu des expositions externes élevées avait des expositions internes encore plus élevées, l'étude serait également trompeuse et tendrait à surestimer le risque issu des rayonnements.

Le document de référence du DOE datant d'avril 1997 révèle également que les archives des doses reçues au cours de la vie des travailleurs n'ont pas été correctement conservées et mises à jour, bien que le risque pour les travailleurs soit basé sur les doses d'irradiation reçues au cours de la vie entière. Si les dossiers médicaux ne sont pas transférés d'une compagnie exploitante d'installation à une autre ou d'une installation à une autre lorsque le travailleur change d'emploi, la santé des

# Mesurer les rayonnements ionisants : terminologie et unités

PAR DAVID CLOSE ET LISA LEDWIGE

**D**es rayonnements ionisants sont émis quand des substances radioactives décroissent. La décroissance radioactive intervient quand le noyau d'un atome décroît spontanément en émettant une particule (une particule alpha, un électron, ou un ou plusieurs neutrons).

Les particules alpha, les particules bêta, les rayons gamma et, indirectement, les neutrons représentent les quatre formes de rayonnements. Tous ont suffisamment d'énergie pour ioniser des atomes ou, en d'autres termes, pour leur ôter un ou plusieurs électrons.

Une **particule alpha** (particule  $\alpha$ ) se compose de deux protons et deux neutrons, soit l'équivalent du noyau d'un atome d'hélium. Les particules alpha provoquent facilement l'ionisation de la matière avec laquelle elles sont en contact et transfèrent de l'énergie aux électrons de cette matière. Une particule alpha peut parcourir plusieurs millimètres dans l'air, mais en général sa portée diminue en fonction de l'augmentation de la densité du milieu. Par exemple, les particules alpha ne traversent pas la couche superficielle de l'épiderme humain, mais si elles sont inhalées elles peuvent endommager les tissus pulmonaires.

Une **particule bêta** (particule  $\beta$ ) est un électron ou un positron et est beaucoup plus légère qu'une particule alpha. Les particules bêta parcourent donc une plus longue distance que les particules alpha avant de perdre leur énergie. Une particule bêta d'énergie moyenne parcourt environ un mètre dans l'air et un millimètre dans un tissu biologique.

Les **rayons gamma** (rayons  $\gamma$ ) sont un rayonnement électromagnétique. Un élément radioactif peut émettre un rayonnement gamma (sous forme de paquets séparés, ou quantas, appelés **photons**) si le noyau résultant d'une décroissance alpha ou bêta est dans un état excité. Les rayons gamma peuvent pénétrer beaucoup plus profondément que les particules alpha ou bêta ; un photon de rayon gamma à haute énergie peut passer à travers une personne sans aucune interaction avec le tissu corporel. Quand des rayons gamma interagissent avec le tissu, ils entraînent une ionisation des atomes. On utilise quelquefois le terme "rayons X" pour désigner les rayons gamma émis par une décroissance radioactive qui se situent sur la partie inférieure du spectre du rayonnement électromagnétique émis par décroissance radioactive.

Les **neutrons** sont des particules neutres qui ne possèdent aucune charge électrique. A la différence des particules alpha et bêta, ils n'ont pas d'interaction avec les électrons et ne provoquent pas directement d'ionisa-

tion. Les neutrons peuvent toutefois provoquer indirectement une ionisation de différentes manières : collisions élastiques, diffusion inélastique, diffusion non élastique, réactions de capture ou processus de spallation. Ces processus débouchent selon les cas sur l'émission de rayons gamma, de rayonnement bêta et, dans le cas de la spallation, sur la production d'autres neutrons. Pour une explication plus détaillée voir *Health Effects of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation (BEIR V report)*, National Academy Press, 1990, p. 15 à 17.

## Mesurer la radioactivité

Les rayonnements ionisants peuvent être mesurés en ayant recours à des unités : les électrons-volts, les ergs et les joules. **L'électron-volt** (eV en abrégé) est une unité qui se rapporte à l'énergie nécessaire pour déplacer des électrons. Un électron est "fortement lié" dans un atome d'hydrogène (un proton et un électron). Il faut de l'énergie pour arracher cet électron du proton. Il faut 13,6 électrons-volts d'énergie pour complètement enlever l'électron du proton. On dit alors que l'atome est "ionisé". En jargon scientifique, "l'énergie d'ionisation" de l'électron fortement lié de l'hydrogène est de 13,6 électrons-volts.

Les électrons sont des objets très légers, et on ne s'attend donc pas à ce qu'un électron-volt représente beaucoup d'énergie. Un électron-volt est équivalent à seulement  $1,6 \times 10^{-19}$  joule d'énergie, autrement dit à 0,16 milliardième de milliardième de joule. Un joule (J en abrégé) est équivalent à la quantité d'énergie utilisée par une lampe d'un watt allumée pendant une seconde. Les énergies qui s'appliquent à la décroissance radioactive vont de quelques milliers à quelques millions d'électron-volts par noyau, ce qui explique que la décroissance radioactive d'un seul noyau amène généralement un très grand nombre d'ionisations.

La radioactivité d'une substance est mesurée par le nombre de noyaux qui subissent une décroissance par unité de temps. L'unité standardisée internationale de radioactivité est appelée le becquerel (Bq en abrégé) et est égale à une désintégration par seconde (dps). La radioactivité est également mesurée en curies, une unité à caractère historique basée sur le nombre de désintégrations par seconde d'un gramme de radium 226 (37 milliards). De ce fait 1 curie = 37 milliards de Bq. Un picocurie (un millième de milliardième de curie) = 0,037 Bq et 1 Bq = 27 picocuries. La radioactivité est également mesurée en désintégration par minute (dpm). Une dpm = 1/60 Bq.

L'activité spécifique est la mesure de la radioactivité d'une unité de masse d'une substance. Les unités sont les curies par gramme ou les becquerels par gramme. Ceci permet de savoir si une substance est plus ou moins radioactive qu'une autre. L'activité spécifique d'un radionucléide est inversement proportionnelle à sa masse atomique et à sa demi-vie.

Les mesures de la radioactivité dans le domaine de l'environnement ou de la biologie sont généralement exprimées sous formes de concentrations de radioactivité dans le sol, l'eau, l'air ou un tissu biologique. On trouvera par exemple des picocuries par litre, des becquerels par mètre cube, des picocuries par gramme, et des désintégrations par minute pour 100 centimètres carrés. Un picocurie (pCi) est égal à  $10^{-12}$  (ou 0,000000000001) curie. Parfois, la masse d'une matière radioactive par unité de sol ou de tissu peut être donnée et exprimée en parties par million, ou ppm, ou peuvent être exprimés en termes de masse. Ces chiffres peuvent être convertis en unités de radioactivité, puisque l'on connaît les activités spécifiques des différents radionucléides. Les désintégrations par minute pour 100 centimètres carrés (dpm/100 cm<sup>2</sup>) sont une unité couram-

ment utilisée pour mesurer la contamination surfacique d'un objet, par exemple en béton ou en métal.

### Mesurer une dose

Placer son corps près d'une source radioactive conduit à recevoir une dose. Pour évaluer le risque associé à cette exposition, il faut calculer la **dose absorbée**. Elle est définie comme l'énergie transmise à une masse définie de tissu biologique. Une dose n'est généralement pas uniformément répartie dans tout le corps. Une substance radioactive peut être assimilée de manière sélective par différents organes ou tissus.

Les doses d'irradiation sont souvent calculées en utilisant le rad (abréviation pour *radiation absorbed dose/dose d'irradiation absorbée*) comme unité. Un rad correspond à 100 ergs/gramme, autrement dit à 100 ergs d'énergie absorbée par un gramme d'un tissu biologique donné. Un erg est égal à 1 dix-millionième de joule. Cent rad équivalent à un joule/kilogramme (J/kg), qui est également égal à un Gray (Gy), l'unité normalisée du système international pour la mesure des doses d'irradiation. Et si le temps est un facteur ? Alors on parle de débit de dose (ou de dose par unité de temps). Un exemple de

## QUELQUES UNITES UTILISEES POUR MESURER LES RAYONNEMENTS IONISANTS ET LES DOSES DE RADIATIONS

UNITE	DESCRIPTION	EQUIVALANT
<b>Rem</b> (roentgen homme équivalent)	Une unité d'équivalent de dose de radiation absorbée qui prend en compte l'efficacité biologique relative des différentes formes de rayonnements ionisants et la façon différente dont ils transfèrent leur énergie aux tissus humains. La dose exprimée en rem est égale à la dose exprimée en rad multipliée par le facteur de qualité (Q). Les rayonnements bêta et gamma ont un facteur de qualité égal à un. Les rems sont donc équivalant aux rads. Pour les rayonnements alpha le facteur de qualité a pour valeur 20, donc les rems valent 20 fois les rads. Le rem est principalement une mesure des dommages biologiques. Pour les neutrons, la valeur typique de Q est de 10.	Rem = rad x Q
<b>Sievert (Sv)</b>	Une unité d'équivalent de dose absorbée de radiation égale à 100 rems.	1 Sv = 100 rem Sv = Gy x Q
<b>Rad</b> (dose absorbée de radiation)	Une unité de dose absorbée de radiation. Le rad est une mesure de la déposition d'énergie dans un tissu biologique.	1 rad = 100 erg/gram
<b>Gray (Gy)</b>	Une unité de dose absorbée de radiation égale à 100 rads. Le gray est une mesure de la déposition d'énergie dans un tissu biologique.	1 Gy = 100 rad
<b>Curie (Ci)</b>	Une unité de radioactivité égale à la radioactivité d'un gramme de radium 226 pur.	1 Ci = 37 milliards dps = 37 milliards Bq
<b>Becquerel (Bq)</b>	L'unité standard de radioactivité égale à une désintégration par seconde	1 Bq = 27 pCi
<b>Désintégrations par seconde (dps)</b>	Le nombre de particules subatomiques (les particules alpha par exemple) ou de photons (les rayons gamma) éjectés du noyau d'un atome par seconde. Une dps = 60 dpm (désintégrations par minute)	1 dps = 1 Bq

Sources: *Nuclear Wastelands*, Makhijani et al., eds., Cambridge: MIT Press, 1995; *Science for Democratic Action*, volume 6 numéro 2, novembre 1997; *Radiation Protection: A Guide for Scientists and Physicians*, 3rd Ed., Jacob Shapiro, Cambridge: Harvard University Press, 1990.

ces unités de débit de dose est le millirad/heure. Dans la vie de tous les jours, un joule (et plus encore un erg) est une quantité d'énergie plutôt petite. Mais en termes de potentialité d'ionisation de molécules ou d'éléments, un joule représente une énorme quantité d'énergie. Un joule de rayonnements ionisants peut provoquer des dizaines de millions de milliards d'ionisations.

Le **roentgen** mesure la quantité d'ionisation dans l'air causée par la décroissance radioactive des noyaux atomiques. Dans un tissu biologique non osseux, un roentgen équivaut à peu près à 0,93 rad. Dans l'air, un roentgen est égal à 0,87 rad. Les cadrans étalonnés en mR/h indiquent des milliroentgen par heure.

En termes physiques, la manière la plus élémentaire de mesurer l'effet d'un rayonnement est de mesurer la quantité d'énergie cédée à une masse donnée de matière. Toutefois, l'apport d'énergie ne représente qu'un des aspects rendant compte des dommages biologiques pouvant être provoqués par les rayonnements. Le détriment causé est plus grand par unité d'énergie quand celle-ci est cédée sur une distance plus courte. Ainsi une particule alpha, qui va céder la totalité de son énergie sur une distance très courte, provoquera beaucoup plus de dommages par unité d'énergie qu'un rayonnement gamma qui va céder son énergie sur un parcours plus long. La masse de matière biologique à laquelle l'énergie est cédée est également un facteur important. La sensibilité des différents organes est également variable. Le

concept d'efficacité biologique relative (EBR) a été créé pour tenter de rendre compte de l'efficacité relative des différentes sortes de rayonnement dans la manière dont ils causent des dommages biologiques.

L'EBR varie en fonction de l'organe exposé, de l'âge de l'exposition, et d'autres facteurs. Un facteur unique, appelé facteur de qualité, est utilisé à des fins réglementaires pour convertir l'énergie cédée en rad, même si cela représente une simplification considérable des risques réels. Pour les rayonnements bêta et gamma, le facteur de qualité utilisé est 1, c'est-à-dire que 1 rad = 1 rem. Les rayonnements alpha provoquent des dommages bien supérieurs par unité d'énergie cédée à un tissu vivant. Le facteur de qualité pour les rayonnements alpha est actuellement de 20 (il faut multiplier par 20 la mesure du rayonnement alpha en rad pour obtenir des rem). Nous disons "actuellement" parce que le facteur de qualité pour le rayonnement alpha a changé au fil des années. Le facteur de qualité utilisé actuellement pour les neutrons est de 10.

Les **facteurs de conversion de dose (FCD)** sont utilisés pour convertir en une dose (exprimée en rems et en sieverts) une quantité de radioactivité (exprimée en curies ou en becquerels) inhalée ou ingérée par une personne. Les FCD utilisés avec une visée réglementaire sont dérivés de diverses données expérimentales et de modèles mathématiques.



## GLOSSAIRE

**Atomes neutres :** Atomes qui ne sont pas porteurs d'une charge électrique nette du fait que leurs charges négatives et positives (portées respectivement par les électrons et les protons) sont exactement en équilibre. Aux températures présentes à la surface de la terre, les atomes des divers éléments sont neutres.

**Dose absorbée :** Quantité d'énergie communiquée à une unité de masse de tissu biologique. Les unités utilisées pour la dose absorbée sont le rad et le gray.

**Dose par irradiation externe :** Dose reçue à partir de sources de rayonnement situées à l'extérieur du corps. Il s'agit le plus souvent de rayons gamma, bien que le rayonnement bêta puisse contribuer à la dose à la peau et à d'autres tissus relativement superficiels.

**Dose par irradiation interne :** Dose aux différents organes du corps à partir de matières radioactives qui ont pénétré dans l'organisme par le biais de l'inhalation, de l'ingestion ou par des coupures et des blessures. Elle peut être constituée d'une combinaison quelconque de rayonnements alpha, bêta ou gamma provoquée par l'incorporation de matières radioactives. L'ionisation indirecte causée par les neutrons qui traversent le corps participe également à l'irradiation interne.

**Efficacité biologique relative (EBR) :** Facteur utilisé pour exprimer la quantité relative de modification biologique entraînée par une unité d'énergie communiquée par un type particulier de rayonnements ionisants dans une partie donnée du corps. L'EBR est complexe et n'est pas spécifique à un organe. En raison de sa complexité, un paramètre simple, appelé facteur de qualité, est appliqué aux différents types de rayonnements, à des fins de pratique réglementaire afin d'estimer les dommages biologiques et le risque de cancer qui en résulte.

**Electron :** Particule élémentaire portant une unité de charge électrique négative. Sa masse représente 1/1836<sup>ème</sup> de celle du proton.

**Equivalent de dose efficace (EDE) :** L'équivalent de la dose au corps entier, calculé en multipliant la dose à un organe particulier (ou à un ensemble d'organes) par un facteur qui permet une représentation approximative de la dose équivalente à l'ensemble du corps et donc du risque de cancer radio-induit.

**Ioniser :** Arracher un ou plusieurs électrons d'un atome ou casser une molécule neutre avec comme résultat la production d'atomes ou de molécules électriquement chargées.

**Neutron :** Particule élémentaire un peu plus lourde qu'un proton, sans charge électrique. Les neutrons libres sont instables et décroissent en protons et en électrons selon une demi-vie d'environ 12 minutes.

**Positron :** Particule élémentaire porteuse d'une charge électrique positive, mais qui est par ailleurs identique à un électron.

**Proton :** Particule élémentaire porteuse d'une charge électrique positive et à la masse de laquelle on attribue la valeur 1 dans l'échelle des masses atomiques.

**Rayonnement alpha :** Rayonnement constitué de noyaux d'hélium qui sont rejetés lors de la désintégration radioactive de certains éléments lourds, dont l'uranium 238, le radium 226 et le plutonium 239. Alpha, la première lettre de l'alphabet grec, s'écrit  $\alpha$ .

**Rayonnement bêta :** Rayonnement constitué par des particules bêta qui sont des électrons ou des positrons (électrons chargés positivement) émis à forte vitesse par certains éléments au cours de leur décroissance radioactive. Bêta, la deuxième lettre de l'alphabet grec, s'écrit  $\beta$ .

**Rayonnement gamma :** Ondes électromagnétiques de forte énergie, issues par exemple de la décroissance radioactive de certains noyaux. Gamma, la troisième lettre de l'alphabet grec, s'écrit  $\gamma$ .

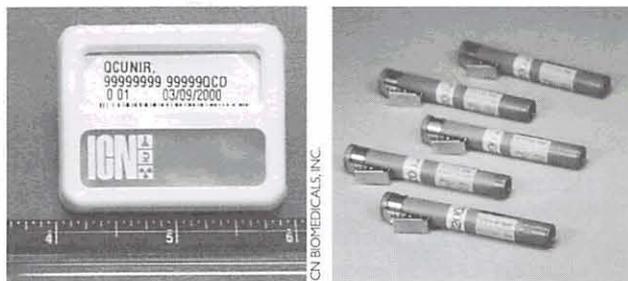
# Mesurer la radioactivité : instruments et méthodes

DAVID CLOSE ET LISA LEDWIGE

Les méthodes et les instruments utilisés pour mesurer l'exposition externe aux rayonnements ionisants peuvent être regroupés en quatre catégories : dosimètres, détecteurs de rayonnement bêta et gamma, détecteurs de rayonnement alpha, et méthodes de détection des neutrons. Il existe également des méthodes, quoique moins directes, pour détecter une irradiation interne. Nous aborderons également la question des mesures des radionucléides dans l'air, l'eau, la végétation et le sol.

## Les dosimètres

Les dosimètres sont des instruments qui rendent compte de l'exposition externe aux rayonnements d'un individu. Les deux dosimètres les plus couramment utilisés sont les **dosimètres thermoluminescents (DTL)** et les **dosimètres photographiques personnels**. Les deux instruments mesurent la dose accumulée sur une période



*Dosimètre photographique personnel*      *Dosimètres de poche*

de temps donnée. Par exemple, les dosimètres photographiques personnels peuvent être portés pendant un mois. Quand ils sont collectés et analysés, on peut déterminer l'exposition totale pour le mois.

Un modèle courant de dosimètre thermoluminescent utilise un cristal de fluorure de lithium. Quand les rayonnements sont absorbés par le fluorure de lithium, les électrons du cristal sont portés à des niveaux d'énergie plus élevés. Certains de ces électrons sont piégés par des impuretés dans le cristal où ils restent dans un état excité jusqu'à ce qu'on chauffe les cristaux. Quand la température du cristal s'élève, les électrons sont relâchés des endroits où ils sont piégés et émettent de la lumière. La lumière émise peut être mesurée et elle est proportionnelle à la quantité de rayonnement à laquelle le cristal du DTL, et vraisemblablement l'individu qui le portait, ont été exposés. Une fois que le cristal a été porté à une température suffisamment élevée, tous les électrons piégés sont relâchés et le dosimètre peut être utilisé à

nouveau. Certains DTL sont suffisamment sensibles pour mesurer une dose de rayonnements bêta et gamma de quelques dizaines de microrads. Certains DTL peuvent également détecter les neutrons.

Les dosimètres photographiques personnels sont utilisés pour contrôler l'exposition personnelle aux rayonnements bêta et gamma. Pour évaluer simultanément plusieurs types de rayonnements, une pellicule de film est recouverte de couches absorbantes. En variant le type et l'épaisseur des couches, on peut déterminer la dose à la peau, la dose au cristallin, et la dose au corps entier. Certains dosimètres photographiques personnels ont une petite fenêtre protégée par une feuille de mica qui peut détecter les rayonnements bêta, et une ou plusieurs sections recouvertes de feuilles métalliques pour détecter les rayonnements gamma. L'exposition du film aux rayonnements est déterminée par le degré de noircissement du film après le développement de celui-ci. Les dosimètres photographiques personnels ressemblent à des badges classiques et peuvent être fixés à une poche ou à la ceinture.

Alors que les dosimètres photographiques personnels et les dosimètres thermoluminescents mesurent la dose reçue par un travailleur sur une longue période de temps, les dosimètres de poche mesurent la dose quotidienne reçue par un travailleur. Au lieu d'attendre des semaines, les dosimètres de poche peuvent détecter si un travailleur a pu recevoir une dose dangereuse au cours d'une séance de travail donnée. En principe, il faudrait porter en même temps un dosimètre photographique personnel ou un DTL et un dosimètre de poche. Les dosimètres de poche peuvent mesurer les rayonnements gamma jusqu'à des énergies atteignant deux MeV. Il s'agit en fait d'instruments capables d'emmagasiner une charge électrique. Ils sont constitués d'une paroi extérieure qui est pour l'essentiel un tube de plastique recouvert d'un matériau conducteur et d'un fil placé au centre à l'intérieur qui est isolé de la paroi extérieure. Un dispositif supplémentaire, appelé chargeur lecteur, est utilisé pour mettre une charge positive sur le fil central. Lorsqu'elle est exposée aux rayonnements, une partie de cette charge positive est neutralisée par les ions créés par les rayonnements. On peut lire les dosimètres directement ou en les plaçant dans le chargeur lecteur pour déterminer la dose de rayonnements effectivement reçue. Les dosimètres de poche ressemblent à des stylos et sont accrochés sur une poche de chemise.

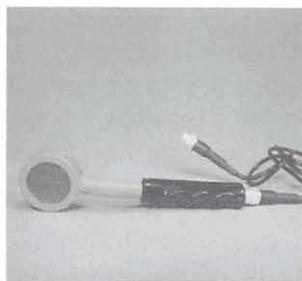
VOIR LA PAGE 14 POUR LES ANNOTATIONS

### Les détecteurs de rayonnements bêta et gamma

Les détecteurs de rayonnements sont des instruments utilisés pour détecter les rayonnements bêta et gamma dans l'air. Ils diffèrent des dosimètres en ce sens qu'ils peuvent mesurer directement les rayonnements, en temps réel. La plupart des détecteurs détectent l'interaction des rayonnements avec des molécules de gaz. Au fur et à mesure que les rayonnements se ralentissent dans un gaz, ils provoquent l'ionisation des atomes de celui-ci en leur arrachant des électrons et en laissant des ions positifs. Dans un détecteur de type Geiger-Müller ou **compteur Geiger**, le vocable sous lequel il est le



Compteur portable (utilisé avec une sonde de scintillation [qui n'est pas montrée] ou sonde GM type «poêle à frire»



Sonde GM type «poêle à frire»

plus connu, le résultat de l'ionisation produit une émission constante d'impulsions électriques, quelle que soit la quantité d'énergie reçue par le détecteur ou la nature du rayonnement ionisant. Au contraire, la mesure en sortie des compteurs à scintillation et des compteurs proportionnels à circulation de gaz est proportionnelle à la quantité d'énergie reçue dans le détecteur.

Un compteur Geiger peut compter les particules bêta et le rayonnement gamma. S'il est équipé d'une fenêtre suffisamment fine (comme dans un détecteur de type «poêle à frire»), un compteur Geiger peut également détecter les particules alpha. La totalité de l'instrument est en fait composée de deux éléments : un tube Geiger-Müller (le détecteur dans lequel les ionisations sont produites) et un amplificateur électronique (qui active un dispositif qui compte les ionisations). Le tube Geiger-Müller consiste en une chambre cylindrique avec un fil métallique tendu en son centre, qui est isolé de la paroi extérieure. Le tube contient un gaz inerte tel que l'hélium ou le néon. Le pôle positif de l'alimentation haute tension est connecté au fil métallique central; le pôle négatif est connecté à l'enveloppe extérieure du tube.

Pour mesurer une source de rayonnement, il faut commencer par positionner le compteur Geiger près de la source. Une particule bêta ou un rayonnement gamma incidents vont alors causer l'ionisation des atomes du

gaz. Les électrons qui en résultent sont fortement attirés par le fil métallique positif. Sur le parcours des électrons il y a d'autres molécules de gaz qui seront également ionisées. Ces nouveaux électrons vont produire d'autres ionisations, aboutissant à des ionisations en cascade. Une ionisation initiale va aboutir à des milliards d'ionisation qui sont recueillies sur le fil métallique positif central. Un amplificateur électronique est alors utilisé pour activer un dispositif de comptage.

Les particules bêta qui atteignent le gaz du détecteur et provoquent des ionisations, sont comptées. Beaucoup de rayons gamma, toutefois, traversent la totalité du gaz sans aucune interaction, et ne sont donc pas enregistrés (à moins que des absorbeurs plus épais ne soient utilisés pour intercepter les rayonnements gamma à haute énergie). Bien qu'un tube Geiger-Müller soit plus efficace pour la détection des particules bêta que pour celle des rayonnements gamma, le tube doit être conçu de telle manière que la fenêtre soit suffisamment fine pour permettre aux particules bêta d'y pénétrer. Le signal de sortie ne peut être utilisé

pour fournir une information sur le type de particule incidente qui a produit un coup. Pour distinguer entre les particules bêta et les rayonnements gamma, des absorbeurs peuvent être utilisés. Par exemple, un absorbeur fin placé entre la source de rayonnements et le tube GM arrêtera toutes les particules bêta, permettant aux rayons gamma de pénétrer dans le détecteur. Le taux de comptage avec et sans absorbeur peut être utilisé pour faire la distinction entre les particules bêta et les rayons gamma.

Alors que les compteurs Geiger comptent les ionisations résultant de l'interaction des rayonnements incidents avec les atomes de gaz, les compteurs à scintillation sont sensibles à l'énergie du rayonnement incident lui-même. Un compteur à scintillation est fait d'une matière qui luit (le scintillateur) quand elle est atteinte par un rayonnement, et d'un amplificateur de lumière. Quand une particule bêta ralentit dans le scintillateur, une fraction de l'énergie qu'elle transmet aux atomes du scintillateur est convertie en lumière. Quand des rayons gamma traversent le scintillateurs, ils produisent des électrons qui se comportent à leur tour exactement comme des particules bêta et convertissent leur énergie en lumière.

Il existe des scintillateurs de toutes formes et de toutes tailles. Certains sont en matière plastique, et d'autres sont des cristaux denses d'iodure de sodium.



Compteur portable (il mesure les rayonnements alpha, bêta et gamma)

Des scintillateurs de taille importante et denses sont nécessaires pour détecter le rayonnement gamma puisque les rayons gamma à haute énergie peuvent traverser des épaisseurs moyennes de matière ordinaire (tissus humains, murs en béton, eau, etc.) avec peu d'interactions. La quantité de lumière produite dans le scintillateur peut être mesurée avec un amplificateur de lumière appelé un photomultiplicateur. La quantité de chaque impulsion de lumière représente une mesure de l'énergie reçue par le scintillateur. La possibilité de mesurer cette énergie signifie que les rayonnements de sources différentes peuvent être identifiés et que l'on peut en même temps évaluer l'importance de la source. Les autres instruments présentés précédemment ne nous permettent pas de distinguer la quantité d'énergie des photons (c'est-à-dire, du type des rayons gamma). En déterminant le type de rayons gamma, nous pouvons en déduire le type de radionucléide qui les a émis.

Les compteurs Geiger peuvent être réalisés sous forme de petits instruments de poche. Ils sont faciles à utiliser comme appareils portables de contrôle de la radioactivité. Les compteurs à scintillation sont généralement des instruments de laboratoire de grande taille.

#### Les détecteurs de rayonnements alpha

Il est techniquement plus difficile de détecter des particules alpha que de détecter des particules bêta ou des rayonnements gamma. Comme les rayonnements bêta et gamma, les particules alpha peuvent produire des ionisations, mais elles ne sont pas aussi pénétrantes.

En principe, les particules alpha pourraient être détectées à l'aide d'un tube GM ordinaire. Les compteurs GM équipés d'un détecteur muni d'une fenêtre en mica très fin (par exemple une sonde de "poêle à frire" GM) peuvent être utilisés pour détecter des rayonnements alpha comme des rayonnements bêta et gamma. Toutefois, les particules alpha sont mieux mesurées à l'aide de ce que l'on appelle des **compteurs proportionnels à courant gazeux**.

Dans certains compteurs proportionnels, la source radioactive qui doit être mesurée, ou l'échantillon, est placée directement à l'intérieur du détecteur. Dans ces tubes "sans fenêtres" l'échantillon est en contact direct avec le gaz de comptage (le gaz du détecteur). Comme dans les compteurs Geiger, le signal produit par un compteur proportionnel est le résultat de la charge électrique qui elle-même est produite par l'ionisation du gaz par le rayonnement incident. Le gaz dans le détecteur est généralement composé à 90% d'argon et à 10% de méthane et circule à travers la chambre à la pression atmosphérique.

Des instruments portables qui mesurent à la fois les rayonnements alpha, bêta et gamma (en termes de

### INSTRUMENTS UTILISÉS POUR MESURER LES RAYONNEMENTS IONISANTS

INSTRUMENT	PEUT MESURER
Dosimètre photographique personnel	particules bêta rayonnement gamma
Dosimètre thermoluminescent (DTL)	particules bêta rayonnement gamma neutrons
Dosimètre de poche	rayonnement gamma
Compteur Geiger-Müller (compteur Geiger)	particules alpha (si un détecteur approprié est utilisé) particules bêta rayonnement gamma
Compteur à scintillation	particules bêta rayonnement gamma
Compteur proportionnel à courant gazeux	particules alpha rayonnement gamma de très faible énergie et particules bêta

quantité d'ionisation qu'ils produisent) avec une lecture en coups par minute ou en milliroentgens par heure sont disponibles dans le commerce (voir la photo d'un compteur portable p. 12). Les compteurs alpha sont utilisés, par exemple, dans des endroits où des travailleurs manipulent du plutonium (un émetteur alpha).

#### Détection des neutrons

Les rayons gamma appartiennent à la catégorie des rayonnements ionisants. Il s'agit de rayonnements électromagnétiques (tout comme la lumière) qui ne sont porteurs d'aucune charge. Ils ôtent les électrons d'atomes neutres en laissant sur leur passage un ion positif. Les particules alpha et bêta sont des ions ; autrement dit, ils portent une charge nette. Les particules alpha sont porteuses d'une charge nette +2 et les particules bêta ont une charge unique négative ou positive. Différents dispositifs, examinés plus haut, ont été employés pour transformer des ions, ou les produits des ionisations, en événements mesurables (coups).

Les neutrons, par contre, sont des particules neutres. Ils ne portent aucune charge électrique et ne provoquent directement aucune irradiation. Les neutrons peuvent être détectés indirectement par le biais des particules chargées qu'ils produisent au cours d'une réaction nucléaire ou par les rayons gamma produits par une ionisation indirecte. Par exemple, une réaction de capture typique met en jeu la capture d'un neutron par l'isotope boron 10. Ceci va initier une réaction nucléaire qui va produire un rayonnement gamma caractéristique qui pourrait être détecté par l'une des méthodes de détection des rayonnements gamma décrites plus haut. Toutefois, le détecteur gamma doit être capable de faire

la distinction entre le rayonnement gamma produit par la réaction nucléaire et le rayonnement gamma provenant d'autres sources.

Il n'est pas si facile d'y parvenir, mais si l'on a une possibilité de détecter l'énergie associée à un rayonnement (voir plus haut les compteurs à scintillation), alors on peut se mettre à la recherche d'énergies de certains niveaux qui pourraient être associées avec une source de rayonnement (par exemple des rayonnements gamma qui sont connus pour être issus de produits de décroissance radioactive). Il est possible de construire des circuits électroniques qui peuvent distinguer les rayonnements gamma caractéristiques de tous les autres.

### Mesures dans l'environnement

Les radionucléides peuvent être mesurés dans l'air, dans l'eau, dans la végétation et dans le sol en utilisant les instruments décrits plus haut en association avec des stations de contrôle de l'air, des prélèvements d'eau suivis d'analyses en laboratoire, des prélèvements de sol, et d'autres méthodes ou équipements. Pour détecter la quantité de rayonnement dans l'air d'un espace de travail, une certaine quantité d'air sera filtrée sur un filtre en papier qui sera ensuite mesuré avec l'un des détecteurs décrits plus hauts.

La radioactivité dans des liquides est mesurée à l'aide un compteur à scintillation liquide. Si le liquide en question est de l'eau, c'est alors une procédure tout à fait courante. Par exemple, des installations utilisant des matières radioactives doivent mesurer la radioactivité dans les déchets liquides pour déterminer si elle est inférieure aux normes définies pour évacuation sous forme de rejets liquides. Il est plus difficile de déterminer le niveau de radioactivité dans d'autres liquides, particulièrement dans des liquides inconnus.

On peut mesurer la concentration d'un radionucléide émetteur gamma dans le sol sur le terrain à l'aide d'un simple compteur Geiger portable. Toutefois, pour détecter des radionucléides spécifiques émetteurs alpha ou bêta, un échantillon de sol sera analysé à l'aide d'un compteur à scintillation ou d'un compteur proportionnel à circulation de gaz, en général dans un laboratoire.

Beaucoup de laboratoires qui effectuent des mesures de radionucléides se soumettent eux-mêmes à des protocoles d'essais. Le Laboratoire des mesures dans l'environnement (EML) du ministère américain de l'énergie évalue les laboratoires participants à travers son programme de contrôle de qualité. Ce programme compare la qualité analytique des laboratoires participants. L'EML publie leur évaluation à peu près deux fois par an et les met à disposition sur son site internet (<http://www.eml.doe.gov/qap/>).

### Dose interne<sup>1</sup>

Des instruments de contrôle externe tels que les détecteurs thermoluminescents, peuvent mesurer à combien de rayonnement externe un travailleur a été soumis, mais pas la dose due aux radionucléides incorporés par inhalation, ingestion ou par d'autres voies. Il est généralement beaucoup plus difficile d'estimer les doses issues de substances présentes à l'intérieur du corps. La grandeur d'une dose interne dépendra entre autres facteurs de la forme chimique de la matière, des voies d'exposition et de la distribution dans le corps, et de son taux d'élimination par l'organisme (appelé demi-vie biologique). Dans la mesure où les facteurs métaboliques varient considérablement d'une personne à une autre, la dose interne reçue par un individu quelconque à partir d'un radionucléide particulier peut être considérablement différente de la dose qui sera calculée en utilisant sa demi-vie biologique moyenne.

Il est essentiel que la surveillance de la radioactivité soit menée avec exactitude et suffisamment de détail. Par exemple, les films dosimétriques et les détecteurs thermoluminescents doivent être stockés convenablement quand ils ne sont pas utilisés de manière à ce qu'ils ne soient pas contaminés en dehors des temps de travail. De même, les travailleurs qui présentent un risque d'exposition interne doivent être contrôlés suffisamment fréquemment pour déterminer avec précision les charges corporelles de radionucléides.

Dans l'industrie de fabrication des armes nucléaires, la dosimétrie des travailleurs et les dossiers rendant compte des expositions sont sérieusement déficients. En 1994, le ministère de l'énergie des Etats-Unis a admis que les dossiers pour l'exposition externe des travailleurs sont incomplets, ne sont pas fiables et peuvent induire en erreur, et ceci est dû partiellement au mauvais calibrage des instruments de mesure, à la délivrance de badges multiples, et au mauvais placement des dosimètres. Plus récemment, une étude qui a évalué la performance d'environ 1000 appareils de contrôle individuels en Europe a découvert que 25% des doses externes enregistrées par les appareils de contrôle pour les rayonnements bêta et les neutrons étaient sous-estimées de manière significative.<sup>2</sup>



- 1 Extrait du bulletin Science for Democratic Action, vol 6, n°2, novembre 1997. La manière de mesurer la dose interne est présentée dans l'article principal de ce numéro à la section intitulée « le contrôle des doses ».
- 2 J.M. Bordy, et al. "Performance Test of Dosimetric Services in the EU Member States and Switzerland for the Routine Assessment of Individual Doses (Photon, Beta and Neutron)", *Radiation Protection Dosimetry* 89 (1-2), p 107-154 (2000), tel que rapporté par le *New Scientist* du 26 août 2000.



# CHER ARJUN

**Cher Arjun ,**

Je voudrais savoir ce que c'est au juste que la transmutation des déchets. Certains articles de journaux et d'autres publications semblent dire qu'il suffit juste d'un accélérateur pour transmuter le combustible nucléaire usé en une forme plus bénigne de déchets. Est-ce que c'est vrai ?

— Monsieur Ledébordé, Cap de la Hague, France

**Cher Monsieur Ledébordé,**

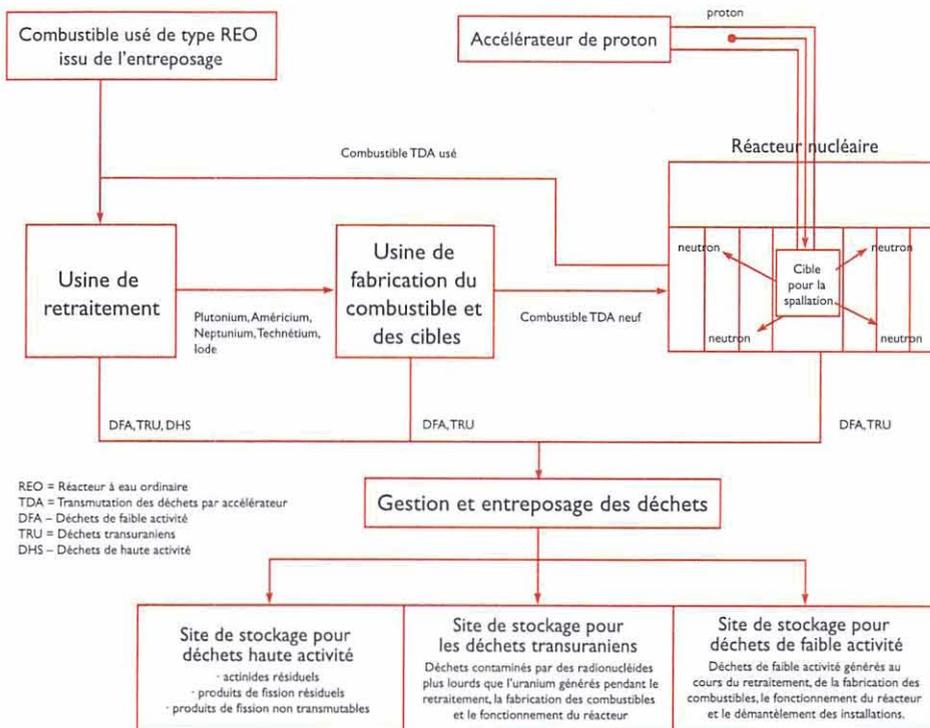
Le terme de " transmutation de déchets par accélérateur " (TDA) vient en fait des anciens alchimistes. La plupart des gens ont entendu parler de leur longue quête pour transformer le plomb en or. Une petite partie d'entre eux était également inquiets du fait que leurs villes en pleine expansion produisaient trop d'ordures. En explorant les moyens de s'en débarrasser, ils sont tombés sur l'idée de " transmutation des déchets par accélérateur ". Le plan consistait à utiliser des catapultes pour projeter les ordures à de longues distances de manière à ce qu'elles se brisent — se transmutent — en mille morceaux en touchant le sol de telle manière que plus personne ne les remarque et ne s'en préoccupe. A la fin, ils ont construit une catapulte à ordures pilote, ou " accélérateur pour déchets ", mais ont vite découvert qu'elle ne faisait que répandre la saleté sur une grande étendue sans s'en débarrasser pour autant. Et ce fut la fin de cette sorte de transmutation des déchets par accélérateur.

La transmutation des déchets par accélérateur renvoie maintenant à la proposition d'un ensemble de technologies nucléaires pour le traitement des combustibles usés hautement radioactifs produits par les réacteurs nucléaires actuels. Pour répondre brièvement à votre question, je dirais que la transmutation des déchets par accélérateur nécessite beaucoup plus que des accélérateurs. Chaque accélérateur alimenterait en neutrons un réacteur nucléaire (ou parfois plusieurs réacteurs nucléaires).

Des installations de retraitement des combustibles usés, de fabrication de combustibles et de gestion des déchets seraient associées à ces accélérateurs/réacteurs. De plus, à la fin, il faudrait tout de même avoir recours à un site d'évacuation définitive à la fois pour les déchets ultimes des accélérateurs et pour les radionucléides qui ne peuvent être transmutés par les accélérateurs. Voyez le diagramme ci-dessous représentant l'ensemble d'un système générique de transmutation des déchets par accélérateur.

Pour une réponse plus détaillée à votre question, veuillez consulter la version non abrégée de ce " Cher Arjun " sur notre site internet.

Pour plus d'information sur la transmutation et la transmutation des déchets par accélérateur, voir Energie et Sécurité n° 13 ou *The Nuclear Alchemy Gamble : An Assessment of Transmutation as a Nuclear Waste Management Strategy* (Le pari de l'alchimie nucléaire : une évaluation de la transmutation en tant que stratégie de gestion des déchets nucléaires). Ce bulletin d'information et le rapport sont disponibles sur le site internet de l'IEER (<http://www.ieer.org>) ou peuvent être commandés en contactant l'IEER.



**Diagramme d'un système TDA générique.** Les rejets dans l'air et l'eau de substances toxiques radioactives et non radioactives ne sont pas indiqués ici. La plus grande proportion proviendrait du retraitement.

travailleurs tout comme celle du public est mise en danger puisqu'il devient impossible de déterminer avec précision les effets sanitaires de l'exposition professionnelle. C'est bien sûr également un facteur qui vient compliquer la réalisation d'études épidémiologiques et l'évaluation du risque des rayonnements.

#### Données concernant les expositions externes

Il est également important d'examiner soigneusement l'état des données concernant les doses externes. Le DOE a reconnu l'existence des problèmes suivants<sup>4</sup> :

- Les données concernant les expositions externes sont souvent incomplètes et peu fiables.
- Les données brutes de doses ne correspondent pas toujours aux versions informatisées des données (qui sont souvent utilisées par les chercheurs au cours de leurs études).
- Dans certains cas, les dossiers médicaux des travailleurs contiennent des informations affirmant que la dose était de zéro, sans tenir compte du chiffre réel qui aurait pu être inscrit sur le dosimètre.

Enfin, peu de mesures ont été prises pour les expositions des travailleurs aux matières dangereuses non-radioactives. Mais nous savons, à partir de la nature du travail effectué dans les installations de fabrication d'armements nucléaires, que de nombreux travailleurs ont été exposés ou couraient le risque d'être exposés à des acides, des solvants organiques, du

béryllium, du fluor et des fluorures, ainsi qu'à des métaux lourds.

Nous pouvons conclure, en conséquence de tous ces problèmes, que la connaissance des expositions sur le lieu de travail pendant la production et l'expérimentation des armements nucléaires était médiocre, et que les résultats d'au moins une partie des études épidémiologiques menées sont très probablement trompeurs. A l'heure actuelle, il est impossible de dire quels effets sanitaires pourraient être révélés si l'on menait des études de façon appropriée. Mais nous pouvons affirmer avec certitude que les doses d'irradiation reçues par de très nombreux travailleurs étaient plus élevées que celles que l'on retrouve dans leurs dossiers médicaux, parce que les doses internes ont été omises jusqu'en 1989, et parce que de très nombreuses erreurs et oublis ont été commis dans l'enregistrement des doses.

- 1 Le document de référence a été faxé à l'IEER le 7 avril 1997 en préparation d'une réunion entre un membre du personnel de l'IEER et le personnel du bureau du DOE pour les programmes de protection des travailleurs et la gestion des risques, tenue le 14 avril 1997.
- 2 Le nom généralement attribué à ce modèle est le "ICRP 30 dosimetric model" (modèle dosimétrique ICRP 30). Les initiales ICRP correspondent à *International Committee on Radiological Protection* - Commission Internationale de Protection Radiologique. Le modèle a été présenté dans la publication n° 30.
- 3 Ce type de situation est tout à fait réaliste parce que de nombreux radionucléides, notamment l'uranium 238, le plutonium 239, le strontium 90 et le tritium donneraient en général des doses externes faibles mais des doses internes élevées.
- 4 Pour plus d'informations sur les problèmes concernant les données de doses externes du DOE, voir l'ouvrage *Nuclear Wastelands*, par Arjun Makhijani, H. Hu et K. Yih, eds., Cambridge : MIT Press, 1995, pages 262-263.

**The Institute for Energy and  
Environmental Research**

6935 Laurel Avenue, Takoma Park, MD 20912,  
USA

Phone: (301) 270-5500

FAX: (301) 270-3029

Adresse Internet: [ieer@ieer.org](mailto:ieer@ieer.org)

Page Web: <http://www.ieer.org>

