

# article de synthèse

---

## Bilan des accidents d'exposition interne\*

J.C. NENOT\*\*

---

(Manuscrit reçu le 17 décembre 1992)

### RÉSUMÉ

La définition d'accident d'exposition interne est beaucoup plus difficile à établir clairement que celle qui concerne les surexpositions externes. Pour ces dernières, la notion d'accident est implicitement liée à un dommage sanitaire résultant alors que, le plus souvent, toute contamination interne, quel qu'en soit le niveau, qu'elle se traduise à terme par un détriment ou non, est qualifiée d'accidentelle. Ce bilan se borne donc à rapporter (1) les accidents d'exposition interne de grande ampleur, parce qu'ils ont concerné un grand nombre de personnes, gravement atteintes ou non ; (2) les contaminations professionnelles qui parfois se sont traduites par des effets à long terme ; et enfin (3) les résultats du suivi de groupes de malades explorés ou traités entre les années 30 et 50 par des produits radioactifs émetteurs alpha.

Parmi les accidents de grande ampleur figurent l'essai nucléaire américain incorrectement programmé de 1954 dans le Pacifique, et responsable de pathologies thyroïdiennes, l'accident de 1957 du complexe militaire Mayak dans l'Oural, l'accident de la centrale nucléaire de Tchernobyl en 1986, et celui de Golanias au Brésil en 1987 dû au démantèlement sauvage d'une source de radiothérapie. Parmi les contaminations professionnelles, sont particulièrement intéressants les suivis médicaux et épidémiologiques des peintres de cadrans lumineux qui utilisèrent le radium dans les années 1910 et des mineurs d'uranium, bien qu'il soit difficile de qualifier ces deux pratiques d'accidentelles, même si les doses reçues à l'époque étaient largement en excès des limites en usage actuellement. Compte tenu des mêmes réserves, les groupes de malades qui ont reçu des quantités relativement importantes de thorostrast (utilisé comme produit de contraste) et ceux traités par du radium (considéré comme agent thérapeutique à large spectre) sont tout aussi intéressants ; ces deux pratiques médicales se sont traduites à long terme par des pathologies diverses, et ont permis, dans une certaine mesure, de quantifier le risque chez l'homme des émetteurs alpha.

### ABSTRACT

The definition of an internal exposure accident is much more difficult to establish clearly than the one concerning external overexposures. For the latter, the notion is implicitly related to resulting health damage, while in most cases any internal contamination, regardless of its level and the upcoming or no of a detriment, is qualified as accidental. Therefore, this overview is limited to (1) large scale internal exposure accidents because large groups of individuals, highly contaminated or not, were involved; (2) occupational contaminations which sometimes resulted into long-term health effects, and (3) the results of the follow-up of patients who were either explored or treated in the 30s and 50s by alpha emitting radionuclides.

---

\* Communication présentée lors de la journée SFRP "L'incorporation professionnelle de radioéléments – dosimétrie et aspects pratiques", Paris, 19 janvier 1993.

\*\* Commissariat à l'énergie atomique, Institut de protection et de sûreté nucléaire (IPSN), BP n° 6, 92265 Fontenay-aux-Roses Cedex.

Among large-scale accidents, mention is made of the 1954 American nuclear test in the Pacific ocean, uncorrectly programmed and responsible for thyroid diseases, of the 1957 accident in the Mayak complex in the Urals, of the Chernobyl nuclear reactor accident in 1986 and of the 1987 Goiania accident due to the uncontrolled dismantling of a teletherapy source. Among occupational contaminations, several medical and epidemiological follow-ups are of particular interest, such as those concerning dial painters who used radium in the years 1910 and uranium miners, although it is difficult to qualify as accidental these practices, even if the doses received at this time were widely in excess of the limits in use nowadays. Taking into account the previous caution, the groups of patients who received relatively large amounts of thorostrast (used as contrast material) and of radium (considered as a large spectrum therapeutic agent) are very interesting as well; these two medical practices resulted into various long-term health effects, and were used, in some degree, to quantify the risk in man of alpha emitters.

---

## 1. La problématique

Si l'on accepte comme définition du terme accident *"tout événement fortuit qui cause ou peut causer des dommages à la santé de l'homme"*, la délimitation des accidents d'exposition interne est beaucoup plus difficile que celle des accidents d'exposition externe. Les raisons en sont multiples.

- Les situations dans lesquelles des professionnels ou des membres du public sont amenés à incorporer des produits radioactifs (par ingestion ou inhalation) sont habituellement considérées comme accidentelles, quels que soient les niveaux de dose qui en résultent.

Il serait plus normal de ne considérer comme accidents que les situations ayant entraîné des expositions potentiellement nocives. Le problème se complique alors, car la dose n'est pas, comme dans le cas des accidents d'exposition externe, reçue dans un temps court. Au contraire, elle est distribuée au fil du temps, en fonction de conditions physique (période du radionucléide contaminant) et biologique (épuration de ce radionucléide de l'organisme). Les périodes effectives qui en résultent sont très variables suivant les éléments (par exemple, de l'ordre de la semaine pour l'iode 131 dans la thyroïde et de 40 ans pour le plutonium 239 dans le squelette). Il en découle que, même en cas de dose engagée relativement élevée, par exemple supérieure à 1 ou 2 Sv à l'organisme entier, il n'apparaîtra pas d'effets déterministes, à cause de l'étalement de l'exposition dans le temps et des facteurs de réduction de gravité qui s'appliquent et qui varient d'un organe à un autre. De ce fait, il ne semble pas raisonnable de conclure que seuls les accidents entraînant des effets déterministes sont à prendre en compte dans le bilan, comme il est implicite de le faire pour les accidents d'exposition externe. En effet, les doses, incapables de causer des effets aigus du fait du mode d'exposition, peuvent être suffisamment élevées pour augmenter de façon inacceptable le risque d'effets stochastiques.

- Une autre complication provient du devenir biologique spécifique du radionucléide contaminant, qui se fixe préférentiellement dans tel ou tel organe de dépôt. Cet organe devient un organe cible. Cette particularité ne se retrouve pas dans le cas des expositions externes, hormis celles pratiquées en radiothérapie, puisque ciblées sur les organes à traiter.

- Il est tout aussi impossible de définir la notion d'accident par l'existence ou non d'une thérapeutique. Là aussi, tout est cas d'espèce, et certaines contaminations sont traitées à bas niveau parce que le traitement est efficace et anodin, et d'autres ne le sont pas à des niveaux plus hauts pour les raisons contraires.

- Les références à la littérature ne peuvent qu'induire des erreurs de jugement : les publications traitant d'expositions internes sont très nombreuses, car porteuses d'enseignement sur le métabolisme et sur les méthodes pour accélérer l'excrétion des radionucléides. Il faut bien voir que la grande majorité de ces publications ne concerne que des incidents n'ayant occasionné aucun dépassement des limites réglementaires.

Dans tout registre d'accidents de contamination, il existe donc un hiatus entre le groupe d'accidents rarissimes ayant causé mort d'homme et le très grand nombre d'événements dont le détrimement est impossible à évaluer, dans la mesure où il existe. De plus, la liste des accidents d'exposition interne qu'il est possible de dresser à partir des données de la littérature ouverte ne peut être exhaustive. Cette imprécision est plus marquée encore que dans le cas des accidents d'exposition externe.

## 2. Les accidents à considérer

Il est hors de doute que les quelques accidents qui ont occasionné le décès des sujets doivent être analysés attentivement. La plupart de ces décès sont survenus en milieu médical. Il est tout aussi évident que sont aussi à prendre en considération des accidents particulièrement instructifs. Les causes de l'intérêt que l'on devrait porter à ces accidents sont diverses : contamination d'un nombre élevé d'individus, contribution aux connaissances (métabolisme, efficacité des traitements) ou enseignement sur la gestion de l'accident ou la radioprotection. Dans ces trois lots émergent particulièrement les contaminations qui concernent :

- les habitants des *îles Marshall* qui ont subi les retombées d'un essai nucléaire mal programmé, dans le Pacifique, en 1954 ;

- les populations de l'*Oural*, contaminées par les rejets journaliers du complexe industriel Mayak dans les années 50 et 60, et par les rejets accidentels survenus dans cette installation militaire en 1957 et 1967 ;

- les populations des trois Républiques d'*Ukraine*, de *Belarus* et de *Russie* qui se sont trouvées sous le vent des retombées de l'accident de Tchernobyl en 1986 ;

- certains habitants de *Goiania* qui ont incorporé des quantités importantes de césium 137, lors du démantèlement sauvage d'une source de radiothérapie en 1987 ;

- les professionnels qui, lors de leur travail, ont subi une contamination isolée donnant ainsi lieu à une étude approfondie ; la littérature est particulièrement riche de ce type de cas, notamment pour le plutonium, les transplutoniens et les produits de fission ;

- les malades contaminés à des niveaux très en excès des modalités normales lors de leur traitement ou par suite d'incidents, comme la rupture de sources scellées (radiothérapie interstitielle ou intracavitaire) ;

- enfin, les malades ayant reçu des injections de produits radioactifs à des fins diagnostiques (thorium) ou thérapeutiques (radium) ; ces pratiques ont eu leur vogue entre les années 30 et 45, et le suivi de ces groupes de patients est assez riche.

### 3. Les accidents mortels de contamination

Quelques accidents mortels, dus à des contaminations massives, ont eu lieu entre 1960 et 1980. Dans le milieu médical, plusieurs malades sont morts des suites d'erreurs graves de prescription. Dans deux cas, en 1966 et 1968, il s'agissait d'exploration hépatique à l'or 198. Par exemple, en 1968 à *Chicago*, une patient de 73 ans a reçu 200 mCi au lieu de 200  $\mu$ Ci, pour une scintigraphie hépatique prescrite pour une affection hématologique de diagnostic difficile ; cette malade est décédée 69 jours plus tard dans un tableau hémorragique [4]. La littérature rapporte 5 décès dus à de l'yttrium 90 en 1980 à *Houston*, suite à un accident hospitalier qui a touché 8 malades. En fait, bien que ce cas soit mal documenté, il s'agit sans doute plus d'exposition externe qu'interne, puisque cet élément est utilisé en radiothérapie interstitielle ou intracavitaire (source scellée), ou encore pour l'irradiation directe de la peau (source non scellée).

Deux accidents mortels ont été dus à l'utilisation industrielle de peinture tritiée, en Allemagne en 1961 et 1964 [26, 33]. Ces derniers accidents sont surprenants et les causes déroutantes. Ces accidents ont entraîné la contamination de 3 et 4 victimes, respectivement.

### 4. Les contaminations de grande ampleur

Les accidents qui entrent dans cette catégorie répondent à des critères communs : (1) le nombre de victimes est important, (2) les doses individuelles ne sont pas extrêmement élevées et (3) seul un suivi épidémiologique peut révéler les effets de l'accident. Les accidents qui entrent dans cette classification sont : l'explosion aérienne thermonucléaire des îles Marshall, la contamination de l'environnement de l'Oural, l'accident de Tchernobyl et l'accident de Goiana.

#### 4.1 L'essai nucléaire de 1954

Le 1<sup>er</sup> mars 1954, des erreurs dans la programmation d'un essai nucléaire (puissance trois fois supérieure à celle prévue, conditions météorologiques défavorables) se sont traduites par des retombées sur quatre atolls de l'océan Pacifique, sur lesquels habitaient 239 autochtones. Seule la population de l'*atoll de Rongelap* a reçu des doses suffisamment élevées pour entraîner des brûlures radiologiques (par les dépôts sur la peau) et des pathologies thyroïdiennes apparaissant au bout d'une dizaine d'années. Les pathologies observés sont en rapport avec les doses élevées à la thyroïde : les adultes de Rongelap ont reçu plus de 3 Gy à la thyroïde et les enfants de moins de 10 ans entre 7 et 10 Gy. Une composante importante de la dose était due à l'iode 131, mais des isotopes à vie courte comme les iodes 132, 133 et 135 ont contribué à plus de la moitié de l'exposition, avec des débits de dose importants. Le tableau I montre la fréquence des nodules et cancers apparus entre 1964 et 1979, avec un recul de plus de 20 ans [10].

Les hypothyroïdies sont aussi en excès : 24 % à Rongelap et Ailingnae (21 sur 86) contre 3 % chez les témoins. Ces valeurs correspondent à des tests hormonaux (TSH) anormaux. Les hypothyroïdies confirmées sont en nombre moindre : 15 % à Rongelap et Ailingnae (13 sur 86).

TABLE I

**Nodules et cancers thyroïdiens apparus dans les îles Marshall, suite à l'essai nucléaire du 1<sup>er</sup> mars 1954, d'après [10]**  
**Thyroid nodules and carcinomas in the Marshallese Islands following a nuclear test in March 1954 [10]**

	Nombre d'individus	Nodules		Cancers	
		Nombre	%	Nombre	%
Rongelap Ailingnae	86	31	36	4	4,7
Utirik	158	15	9,5	3	1,9
témoins	437	29	6,6	4	0,9

#### 4.2 Les contaminations par les rejets du complexe Mayak (Oural)

Depuis sa construction en 1948, le complexe Mayak (à l'origine dénommé Tcheliabinsk-40), édifié à la hâte pour rattraper le retard de l'URSS dans l'armement nucléaire, a rejeté de façon "habituelle" des quantités énormes de produits radioactifs dont le cumul se chiffre aux alentours de 40 EBq (1 milliard de curies) pour les rejets liquides. De plus, un accident en 1957, dû à l'explosion d'une cuve de stockage de déchets de haute activité, a donné lieu à la dispersion de 75 PBq (2 millions de curie) dont 90 % d'éléments à vie courte et environ 5 % de strontium 90.

Les rejets du fonctionnement normal ont exposé, à des degrés divers, près de 250 000 personnes, dont 7 500 durent être évacuées. Bien que ces expositions aient été en rapport avec un fonctionnement considéré alors en URSS comme normal (alors que ces méthodes étaient déjà à l'époque considérées comme inacceptables), elles peuvent être classées dans la rubrique "accidents" ; ceci est d'autant plus valable que ces mêmes populations ont été exposées lors des accidents de 1957 et 1967 et qu'il est impossible d'évaluer la contribution de chaque cause d'exposition dans le bilan global des conséquences [3, 7-8]. Ces conséquences ont été importantes. Sont relevés notamment des cas nombreux de "maladie chronique des rayonnements", mais aussi une augmentation de la fréquence des leucémies, constatée dans un groupe de 17 200 personnes suivi depuis 1950. L'excès est de 40 %, avec 37 cas constatés, à comparer à 22 attendus. La mortalité des habitants riverains de la rivière *Tetcha*, qui a servi de déversoir, a été plus élevée que la moyenne, avec des excès d'environ 20 %. Ces résultats doivent être considérés avec prudence, compte tenu du délai écoulé entre les faits et leur relation, et des moyens précaires dont disposaient les responsables.

#### **4.3 L'accident de Tchernobyl, 1986**

Le 26 avril 1986, la tranche n° 4 de Tchernobyl commençait à rejeter une fraction importante du contenu du cœur du réacteur ; le rejet a duré jusqu'au 6 mai. Les produits radioactifs importants du point de vue sanitaire ont été le césium 137 (75 PBq, soit 2 millions de curies) et l'iode 131 (2 EBq, soit 50 millions de curies) [17]. Les autorités locales et centrales ont eu beaucoup de mal à mettre sur pied un suivi fiable des populations. Six ans après l'accident, les données sont fragmentaires, insuffisantes, et parfois contradictoires ; l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) a fait, en 1991, une analyse de la situation et établi un bilan de santé [1]. Des organisations internationales de renom comme l'Organisation mondiale de la santé (OMS), les Communautés européennes, des institutions étrangères diverses essayent de mettre sur pied, en collaboration avec les trois républiques d'Ukraine, de Belarus et de Russie, les moyens nécessaires à une réelle étude épidémiologique, basée sur le dépistage et le suivi médical des populations exposées.

A ce jour, le seul point marquant est un excès de cancers thyroïdiens chez les enfants de la région de Gomel (la ville de Gomel est à 140 km au nord de Tchernobyl mais la frontière entre Ukraine et Belarus est beaucoup moins éloignée du réacteur), qui a été particulièrement atteinte par les retombées des premiers et derniers jours [20]. L'augmentation a eu lieu en 1990 et s'est poursuivie en 1991 et 1992. Le taux rapporté montre une importante augmentation chez les enfants de moins de 15 ans, avec 80 par million d'enfants et par an, à comparer avec l'incidence normale de l'ordre de 1 par million et par an. Seul le suivi sur les années à venir permettra de confirmer cet excès des cancers de la thyroïde chez les enfants de Belarus.

#### 4.4 L'accident de Goiânia, 1987

Les conséquences les plus graves du démantèlement sauvage d'une source de téléthérapie de chlorure de césium 137 (50,9 TBq, soit 1 375 Ci) furent les irradiations globales et localisées de nombreux habitants de Goiânia, au Brésil, en 1987. Ces expositions se traduisirent par 4 décès et de nombreuses brûlures radiologiques. Un nombre élevé d'habitants furent aussi contaminés, principalement par ingestion, à cause de l'extrême solubilité de la source [2, 5].

Parmi 87 personnes particulièrement contaminées, les quantités de césium incorporé s'échelonnèrent entre 1 kBq (27 nCi) et 1 GBq (27 mCi). La charge la plus élevée a concerné un enfant de 6 ans, et correspond à une dose engagée d'environ 6 Gy. Une trentaine de personnes ont reçu entre 0,1 et 1 Gy (dose engagée sur la vie). Le traitement par le bleu de Prusse à fortes doses (jusqu'à 10 g par jour chez l'adulte et 3 g chez les enfants de moins de 10 ans) s'est révélé efficace, en réduisant les périodes biologiques d'un facteur allant jusqu'à 2.

### 5. Les contaminations professionnelles

Les rapports concernant les contaminations survenues au cours du travail sont très nombreux ; les doses engagées par ces contaminations sont, en général, inférieures aux limites réglementaires. Ces contaminations constituent une source d'enseignement sur le métabolisme de certains radionucléides et les moyens thérapeutiques. La liste des contaminations accidentelles qui présentent un intérêt du point de vue de la sûreté et/ou de la protection est, cependant, longue et fastidieuse, bien qu'extrêmement variée. De plus, elle ne peut être exhaustive. C'est pourquoi les exemples donnés ci-après ne sont cités qu'à titre démonstratif et comme représentatifs de séries plus ou moins importantes.

#### 5.1 Le radium

La contamination professionnelle par le radium constitue un des exemples historiques des études épidémiologiques sur l'effet à long terme des rayonnements. Entre 1910 et 1920, les peintres des cadrans lumineux – dont une majorité de femmes – humidifiaient avec les lèvres les pinceaux leur servant à peindre les cadrans avec un produit à base de radium 226 et 228. Cette pratique, entraînant une ingestion chronique de radium, a provoqué un excès de décès par cancer osseux. C'est en 1925 que cette pratique a été interdite, dès la reconnaissance de la cause de ces cancers [6, 24]. Le suivi sur plus de 50 ans montre un excès de décès par ostéosarcomes et carcinomes, la plupart ayant le sinus nasal ou la mastoïde comme localisation primitive. Les premières études de relation dose-effet ont d'abord mis en évidence un seuil aux environs de 10 Gy. Ce seuil a ensuite été remis en cause par l'observation d'un groupe plus important, par la survenue d'un nombre supplé-

mentaire de cancers avec le temps écoulé et par l'utilisation d'un modèle dosimétrique plus réaliste [25, 38].

### **5.2 Le radon**

L'exposition au radon des mineurs de fond d'uranium ne peut, en aucun cas, être qualifiée d'accidentelle, puisqu'elle est contrôlée et maintenue inférieure aux limites réglementaires. Cependant, puisque l'extraction de l'uranium a causé, particulièrement chez les mineurs américains et tchécoslovaques, durant les premières années d'exploitation, une augmentation de la fréquence du cancer des poumons, il semblerait anormal de ne pas faire un bref rappel. Ce cas illustre la difficulté du choix des critères de classification des accidents d'exposition interne, puisque nombre "d'accidents" n'entraînent aucun dommage et que l'exposition professionnelle au radon s'est accompagnée d'un notable détrimement.

Les mineurs d'uranium représentent le groupe le plus homogène de travailleurs soumis à un risque spécifique de contamination aérienne par le radon, dont les descendants solides se fixent sur l'épithélium bronchique, et par les poussières d'uranium. Les premiers cancers bronchiques ont été décrits au début du siècle chez des mineurs avant même que le radon n'ait été identifié. Plusieurs études montrent l'action cancérogène des produits de filiation du radon, la plupart se rapportant à des expositions élevées [16, 18, 34]. Une étude analogue menée par l'Institut de protection et de sûreté nucléaire sur une cohorte de mineurs français, avec des expositions relativement moins élevées, montre aussi un excès de cancers du poumon, significatif chez les mineurs de fond ayant travaillé entre 1946 et 1972 [37].

### **5.3 Le plutonium et les transplutoniens**

Les contaminations par le plutonium sont, en général, répertoriées et suivies, ce radionucléide étant réputé particulièrement toxique. Il existe aux Etats-Unis, depuis les années 50, un suivi méthodique des travailleurs qui ont manipulé des transuraniens, avec constitution de registres à visée épidémiologique. Dans cet *US Transuranium Registry*, les causes de mortalité sont enregistrées, ainsi que la distribution des radionucléides dans l'organisme après la mort, chaque fois qu'une autopsie peut être pratiquée. Ce registre donne lieu à des publications régulières, le plus souvent ciblées sur un radionucléide, comme, par exemple, le plutonium ou l'américium. En fait, aucune étude n'a rapporté d'effets à court ou long terme consécutifs à des contaminations importantes. L'étude la plus intéressante est le suivi méthodique entre les années 1952 et 1979 des travailleurs américains du projet Manhattan, à l'origine de la fabrication des premières armes nucléaires. Aucun effet attribuable à la contamination par du plutonium, loin d'être négligeable, n'a pu être mis en évidence, avec un recul d'une quarantaine d'années [40].

Une contamination importante est survenue à Hanford (USA) en 1976, lors de l'explosion d'une boîte à gants dans laquelle un travailleur mani-

pulait de l'américium 241. Ce travailleur a subi des brûlures cutanées et une contamination pulmonaire très importante [14–15]. Le traitement par chélateur (DTPA) a été très efficace mais la réduction de la charge pulmonaire n'aurait peut-être pas été suffisante pour empêcher la survenue tardive d'une fibrose pulmonaire grave. L'espérance de vie du sujet, qui avait 61 ans au moment de l'accident, était cependant insuffisante pour valider cette éventualité.

Une autre contamination pulmonaire importante par du plutonium 239 a eu lieu aux Etats-Unis il y a plus de 20 ans et constitue le seul exemple de traitement par lavage pulmonaire [22, 27, 30]. Ce traitement fut décidé à cause des risques potentiels à long terme ; il a réduit le dépôt pulmonaire du plutonium d'un facteur 2.

La liste des contaminations professionnelles par des émetteurs alpha est longue et fastidieuse, mais chaque cas est intéressant pris isolément, car ayant ses caractères propres [cf. 19, 22, 31, 39, 41]. Il en va de même pour la liste des contaminations par des radionucléides  $\beta$  ou  $\gamma$  [cf. 13, 21, 28-29, 32, 41] ; pour ces derniers, aucune pathologie résultante n'a été mise en évidence.

## 6. Les contaminations de personnes du public

Hormis les grandes dispersions de sources importantes dans l'environnement, comme ce fut le cas dans les accidents de Goiania et de Tchernobyl, ou après l'essai nucléaire du Pacifique, ou encore suite aux rejets désastreux du complexe militaire Mayak dans l'Oural, déjà évoqués précédemment, il existe peu de cas de contamination du public.

Un cas de contamination par de l'américium 241 de toute une famille aux Etats-Unis, dû au "bricolage" d'une expérience qu'un chercheur poursuivait dans son propre garage ne s'est soldé par aucun effet, malgré les niveaux élevés relevés chez un jeune enfant [9]. La plupart des contaminations de personnes du public sont, en fait, dues, le plus souvent, à des surdosages lors de prescriptions médicales pour des examens pratiqués en médecine nucléaire. A l'exception des quelques cas gravissimes signalés plus haut, aucun n'a entraîné d'effet sur la santé des patients.

Beaucoup plus lourdes de conséquences ont été les pratiques médicales utilisées entre les années 30 et 50, qui consistaient à se servir du thorium 232, sous forme de  $\text{ThO}_2$ , comme substance de contraste pour pratiquer des angiographies. De même, dans les années 30, des groupes importants de malades étaient traités pour des affections variées avec du radium, administré par la bouche ou en injections intramusculaires. Il est évidemment difficile de classer ces contaminations médicales voulues dans une rubrique "accidents". Seules les conséquences néfastes dues à l'ignorance d'effets potentiels permettent d'y faire référence, ne serait-ce que pour hiérarchiser les cas de contamination et leurs conséquences.

### 6.1 Le thorotrast

Le thorotrast était une suspension fine, à 25 %, d'oxyde de thorium 232, et contenait en proportion variable ses produits de filiation ; il était donc plus "radioactif" que si le minerai avait été raffiné pour obtenir du thorium pur. Etant donné la petitesse de leur taille, les particules de thorium étaient phagocytées rapidement par les cellules réticulo-endothéliales du foie, de la rate et de la moelle, ainsi que par les cellules hépatiques.

Des milliers de patients ont ainsi été explorés par ce produit pendant une vingtaine d'années. Les doses engagées aux organes de dépôt étaient élevées : pour 25 ml injectés (les quantités variaient de 5 à plus de 50 ml), les doses sur 30 ans ont été estimées aux environs de 7,5 Gy au foie, 2 à 5 Gy à l'endoste, 2,7 Gy à la moelle osseuse, par exemple. Ces examens n'ont eu de faveur que dans un nombre limité de pays : Danemark, Allemagne, Portugal, Japon, Royaume-Uni, Etats-Unis, pour citer les principaux. Le suivi épidémiologique, mené de façon rigoureuse, a permis de mettre en évidence des excès de cancers du foie en nombre significatif et, en nombre moindre, d'angiosarcomes, d'ostéosarcomes et de mésothéliomes subpleuraux [11, 36]. Les chercheurs américains se sont tardivement intéressés à la toxicité du thorium, en analysant les cohortes européennes, en affinant la dosimétrie et en lançant de grandes séries d'expériences animales. Le but était de quantifier le risque cancérigène des émetteurs alpha déposés dans les organes. Des valeurs de risque de cancer du foie de l'ordre de  $3 \cdot 10^{-2} \text{ Gy}^{-1}$  semblent pertinentes.

### 6.2 Le radium

Les groupes de malades traités par du radium sont beaucoup plus réduits que ceux ayant reçu du thorotrast. De plus, cette pratique a été limitée dans le temps et a pris fin en 1933. La gamme des affections traitées était très large : fatigabilité, myocardite, arthrite, poliomyélite, affections vénériennes et troubles mentaux. Ces séries de malades sont très mal documentées, d'autant plus que nombre d'entre eux ignoraient la nature de leur traitement ; pour certains d'entre eux, c'est le caractère de leur pathologie qui a fait découvrir l'agent causal [12]. Dans la plupart des cas, la localisation du cancer a été osseuse. La quantification du risque est difficile pour cette série, car les quantités administrées sont très imprécises. Les résultats ne sont, cependant, pas en désaccord avec ceux des peintres de cadrans lumineux, qui représentent une cohorte beaucoup plus robuste [35].

## 7. Conclusions

A l'inverse des expositions externes accidentelles pour lesquelles il est facile de faire un classement stéréotypé clair, en se basant sur la topographie de l'exposition – globale ou localisée –, sur la gravité des

effets et la nature du syndrome radioinduit, etc., tout essai de classement des surexpositions internes fait appel à l'arbitraire et la notion même d'accident devient vite très floue.

Cependant, le bilan des accidents dus à l'incorporation de produits radioactifs montre à l'évidence la diversité des problèmes soulevés et le grand nombre de secteurs de l'industrie et de la médecine qui sont concernés. Il montre aussi l'absence générale de gravité des cas de contamination réellement accidentels hormis quelques séries historiques comme les peintres de cadrans lumineux ou les malades ayant reçu du thorotrast qu'il est audacieux de présenter comme des accidents. Ce bilan peut aussi surprendre par le nombre de cas décrits, étant donné les efforts louables faits dans tous les secteurs pour mettre les professionnels et le public à l'abri de toute exposition interne, même peu conséquente. Comme pour les expositions externes, il faudrait rapporter le nombre de cas (en plus d'un demi-siècle) au nombre total de personnes exposées au risque de contamination ; le faible pourcentage que cela représente ne doit pas constituer une raison suffisante pour ne pas poursuivre tous les efforts nécessaires pour une meilleure connaissance du métabolisme des radionucléides, des traitements appropriés en cas de contamination et la prévention des expositions internes. ■

## RÉFÉRENCES

- [1] AGENCE INTERNATIONALE DE L'ENERGIE ATOMIQUE (AIEA) – The international Chernobyl project, an overview. Assessment of radiological consequences and evaluation of protective measures, report by an international advisory committee. Vienne : AIEA, 1991.
- [2] AGENCE INTERNATIONALE DE L'ENERGIE ATOMIQUE (AIEA) – L'accident radiologique de Goiania. Vienne : AIEA, 1989.
- [3] ANTROPOVA Z.G., BELOVA E.L., DIBODES I.K., KIRUCHKIN V.I., PANTELEEV L.I., PANTCHENKO I.A., POVALIAEV A.P., SARAPULTSEV I.A., SAFRONOVA H.G., SKRIABIN A.M. – Conséquences de l'accident de l'Oural (Kyshtym) du 29 septembre 1957 (Trad. franç. par IPSN). Rapport IPSN 90/2. Fontenay-aux-Roses : IPSN, 1990.
- [4] BARON J.M., YACHNIN S., POLCYN R., FITCH F.W., STURNER W.Q. – Accidental radiogold ( $^{198}\text{Au}$ ) liver scan overdose with fatal outcome. *In* : The handling of radiation accidents, Vienna, 19-23 May 1969. Vienne : AIEA, 1969, 399-408.
- [5] BERTELLI L., LIPSZTEIN J.L., OLIVEIRA C.A.N., MELO D.R. – Internal  $^{137}\text{Cs}$  contamination in the Goiania, Brazil accident. *In* : The medical basis for radiation accidents preparedness II. Clinical experience and follow-up since 1979, Oak-Ridge, October 20-22, 1988 (R.C. Ricks, S.A. Fry, Eds.). New-York : Elsevier, 1990.
- [6] BLUM T. – Osteomyelitis of the mandible and maxilla. *J. Am. Dent. Assoc.*, 1924, 2, 672-674.
- [7] BOLSHAKOV V.N., ALEKSAKHINE R.M., BOLSHOV L.A., KOTCHETKOV L.A., TSYB A.F., TCHOUKANOV V.N., PETOUKHOV V.I. – Conclusions de la Commission de l'industrie et de l'énergie nucléaire de l'URSS (Minatomenergopom), créée par le Praesidium de l'Académie des sciences, pour l'examen de la situa-

- tion écologique de la zone du complexe industriel Mayak (n° 1140-501 du 12.06.90). *Radioecologica*, 1991, n° 31 (traduit en français par l'IPSN).
- [8] BULDAKOV L.A., DEMIN S.N., KOSTYUCHENKO V.A., KOSHURNIKOVA N.A., KRESTININA L. Yu., SAUROV M.M., TERNOVSKIJ I.A., TOKARSKAYA Z.B., SHVEDOV V.L. – Medical consequences of the radiation accident in the southern Urals in 1957. *In* : Recovery operations in the event of a nuclear accident or radiological accident, Vienna, 6-10 November 1989. Vienne : AIEA, 1990, 419-431.
- [9] COHEN N., SASSO T.L., WRENN McD. – Metabolism of americium 241 in man ; an unusual case of internal contamination of a child and his father. *Science*, 1979, 206, 64-66.
- [10] CONARD R.A. – The 1954 Bikini atoll accident : an update of the findings in the Marshallese people. *In* : The medical basis for radiation accident preparedness, Oak-Ridge, October 18-29, 1979 (K.F. Hübner, S.A. Fry, Eds.). New York : Elsevier/North Holland, 1980, 55-58.
- [11] FABER M. – Thorotrast in man – the carrier state and the sequelae. *In* : Some aspects of internal irradiation, Heber City, Utah, May 8-11, 1961 (T.F. Dougherty, W.S.S. Jee, C.W. Mays, B.J. Stover, Eds.). New York : Pergamon Press, 1962, 473-498.
- [12] FINKEL A.J., MILLER C.E., HASTERLIK R.J. – Radium induced malignant tumors in man. *In* : Delayed effects of bone seeking radionuclides, Sun Valley, September 12-14, 1967 (C.W. Mays, W.S.S. Jee, R.D. Lloyd, B.J. Stover, J.H. Dougherty, G.N. Taylor, Eds.), Salt Lake City : University of Utah Press, 1967, 195-225.
- [13] GELER L.I. – A case of radiation sickness due to radiocesium. *Medit. Radiol.* 1963, n° 2, 23-25.
- [14] HEID K.R., PALMER H.E., Mc MURRAY B.J., BREITENSTEIN B.D., WALD N. – The 1976 Hanford americium incident. *In* : Biological implications of radionuclides released from nuclear industries, Vienna, 26-30 March 1979. Vienne : AIEA, 1979, 27-38.
- [15] HEID K.R., BREITENSTEIN B.D., PALMER H.E., Mc MURRAY B.J., WALD N. – The 1976 Hanford americium accident. *In* : The medical basis for radiation accident preparedness, Oak-Ridge, October 18-20, 1979 (K.F. Hübner, S.A. Fry, Eds.). New York : Elsevier/North Holland, 1980, 345-355.
- [16] HORNING R.W., MEINHARDT J.J. – Quantitative risk assessment of lung cancer in US uranium miners. *Health Phys.*, 1987, 52, 417-430.
- [17] INSTITUT DE PROTECTION ET DE SURETE NUCLEAIRE (IPSN) – L'accident de Tchernobyl (Rapport IPSN 2/86, rev. 3). Fontenay-aux-Roses : IPSN, 1986.
- [18] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION (ICRP) – Lung cancer risk from indoor exposures to radon daughters (ICRP publication 50). *Ann. ICRP*, 1987, 17 (1).
- [19] JEANMAIRE L., BALLADA J. – Etude de deux cas de contamination par Am-241. *In* : Problèmes de radioprotection posés par les éléments transuraniens, Karlsruhe, September 21-25, 1970 (EUR/4612). Luxembourg : Communautés européennes, 1971, 531-546.
- [20] KAZAKOV V.S., DEMINDCHIK E.P., ASTAKHOVA L.N., BAVERSTOCK K., EGLOFF B., PINCHERA A., RUTCHI C., WILLIAMS D. – Thyroid cancer after Chernobyl. *Nature*, 1992, 359 (6390) 21-22.
- [21] KIRILOV S.A., VISSONOV Yu Y. – A case of affection with cesium radioactive isotopes. *Medit. Radiol.*, 1968, n° 12, 20-25.
- [22] LAFUMA J. – Diagnostic et traitement d'un cas d'intoxication par le plutonium, local d'abord et généralisé ensuite. *In* : Diagnosis and treatment of radioactive poisoning, Vienna, 15-18 October 1962. Vienne : AIEA, 1963, 381-386.

- [23] McCLELLAN R.O., BOYD H.A., BENJAMIN S.A., CUDDIHY R.G., HAHN F.F., JONES R.K., MAUDERLY J.L., MEWHINNEY J.A., MUGGENBURG B.A., PFLEGER R.C. – Recovery of  $^{239}\text{Pu}$  following bronchopulmonary lavage and DTPA treatment of an accidental inhalation exposure case. *Health Phys.*, 1972, 23, 426 (Abstract P/102).
- [24] MARTLAND H.S., CONLON P., KNEF J.P. – Some unrecognized dangers in the use and handling of radioactive substances. *J.A.M.A.*, 1925, 85, 1769-1776.
- [25] MAYS C.W. – Alpha-particle induced cancers in humans. *Health Phys.*, 1988, 55, (4) 637-652.
- [26] MINDER W. – Interne Kontamination mit Tritium. *Strahlentherapie*, 1979, 137, 700-704.
- [27] MUGGENBURG B.A., JONES R.K. – Clinical and experimental use of bronchopulmonary lavage : a review. (Fission product inhalation program annual report 1970-1971, LF-44). Albuquerque N.M. : Lovelace foundation, 1971.
- [28] NISHIYAMA H., SAENGER E.L., GROSSMAN L.W., LUKES S.J. – Accidental Cs-137 contamination. *Radiology*, 1985, 154 (2) 513-517.
- [29] PARTHASARATHY K.L., KOMERЕК M., QUAIN B., BAKSHI S.P., QUZESHI F., SHIMAOKA K., RAO U., ADAMSKI I.S., BENDER M.A. – Necropsy of a cadaver containing 50 mCi of sodium iodure-131. *J. Nucl. Med.*, 1983, 23, 777-780.
- [30] PFLEGER R.C., WILSON A.J., McCLELLAN R.O. – Pulmonary lavage as a therapeutic measure for removing inhaled "insoluble" materials from the lung. *Health Phys.*, 1969, 16, 758-763.
- [31] PODA G.A., HALL R.M. – Two californium-252 inhalation cases. *Health Phys.*, 1975, 29, 407-409.
- [32] SAFRONOV Ye I. – A case of radiation sickness from international irradiation. *Studies in medical radiology (trad. du russe)*. Rapport JPRS-24, 1964.
- [33] SEELENTAG W. – Two cases of tritium fatality. *In* : Tritium symposium, Las Vegas, August 1971 (A. Moghissi, M.W. Carter, Eds.). Phoenix : Messenger graphics, 1971, p. 267.
- [34] SEVC J., KUNZ E., TOMASEK L. – Cancer in man after exposure to Rn daughters. *Health Phys.*, 1988, 54, 27-46.
- [35] STANNARD J.N. – Radioactivity and health, a history. Chap. 1 : First it was radium (R.W. Baalman, Jr., Ed.). Springfield : NTIS, 1988, 15-78.
- [36] STANNARD J.N. – Radioactivity and health, a history. Chap. 4 : Polonium and thorium (R.W. Baalman, Jr., Ed.). Springfield : NTIS, 1988, 234-267.
- [37] TIRMARCHE M., HUBERT Ph. – Epidémiologie des faibles doses. *Rev. Gén. Nucl.*, 1992, n° 6, 469-475.
- [38] UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION (UNSCEAR) – Sources, effects and risks of ionizing radiation, 1988 report to the General assembly, with annexes. New York : United Nations, 1988.
- [39] VAANE J.P., De RAS E.M.M. – Analysis of a case of internal contamination with  $^{242}\text{Cm}$ . *Health Phys.*, 1971, 21, 821-826.
- [40] VOELZ G.L., LAWRENCE J.N.P. – A 42-y medical follow-up of Manhattan project plutonium workers. *Health Phys.*, 1991, 61 (2), 181-190.
- [41] ZIQUIANG P., ZHENGPING L. – Selected compilation of clinical cases for overexposure workers of the Chinese nuclear industry in the past 30 years. Rapport CNIC-00318, DSPHN-0003, Pekin, 1989.