



IRSN

INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Les accidents dus aux rayonnements ionisants

// le bilan sur un demi-siècle

Edition du 15 février 2007

Les accidents dus aux rayonnements ionisants

// le bilan sur un demi-siècle

Première parution le 15 février 2007

Rapport IRSN-2007/79-FR

ISRN IRSN-2007/79-FR

L'IRSN

// en bref

L'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN), créé par la loi n°2001-398 du 09/05/2001 et dont les missions et l'organisation ont été précisées par le décret n°2002-254 du 22 février 2002, est un établissement public industriel et commercial (EPIC), placé sous la tutelle conjointe des ministres chargés de la Défense, de l'Environnement, de l'Industrie, de la Recherche et de la Santé.

Il rassemble plus de 1 500 spécialistes : ingénieurs, chercheurs, médecins, agronomes, vétérinaires et techniciens, experts compétents en sûreté nucléaire et en radioprotection, ainsi que dans le domaine du contrôle des matières nucléaires et sensibles.

L'Institut exerce des missions d'expertise et de recherche dans les domaines suivants :

- sûreté nucléaire;
- sûreté des transports de matières radioactives et fissiles ;
- protection de l'homme et de l'environnement contre les rayonnements ionisants ;
- protection et contrôle des matières nucléaires;
- protection des installations et des transports de matières radioactives et fissiles contre les actes de malveillance.

Doctrines et synthèses

Editions propriété de l'IRSN
77-83, avenue du Général de
Gaulle
92140 Clamart
Tél : 01-58-35-88-88

Site web: www.irsn.fr

Sauf autorisation écrite, tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tout procédé et pour tout type d'usage, sont interdits. Pour plus d'informations contacter :

IRSN
Odile Lefèvre
BP 17
92262 Fontenay aux Roses cedex
Fax : +33 (0) 1 58 35 73 82

doc.syn@irsn.fr

L'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire conduit des programmes de recherche et des études sur les risques nucléaires et radiologiques, il est responsable de missions de service public dans le champ de la prévention de ces risques et il fournit un appui technique aux autorités publiques compétentes en matière de sûreté et de sécurité nucléaires et de radioprotection. A ces différents titres, l'Institut est amené à prendre position sur un certain nombre de sujets à caractère scientifique et technique.

Dans le cadre de sa politique de transparence et avec le souci de mettre à la disposition de l'ensemble des partenaires ou parties prenantes concernés une information de qualité facilitant l'élaboration de leur propre jugement, l'IRSN publie des "documents de doctrine et de synthèse", qui présentent la position de l'Institut sur un sujet particulier.

Ces documents sont élaborés par des experts de l'IRSN, le cas échéant en collaboration avec des experts extérieurs, puis soumis à un processus de validation sous assurance qualité.

Ils reflètent la position de l'IRSN au jour de leur publication sur son site internet. Cette position peut être revue, en fonction du progrès des connaissances scientifiques, des évolutions réglementaires, ou de la nécessité de son approfondissement en réponse à un besoin interne, ou à des sollicitations extérieures.

Ce document peut être librement utilisé et cité, à condition d'en mentionner la source et la date de publication.

Les commentaires sont bienvenus. Ils peuvent être transmis à l'adresse indiquée en marge en faisant référence au document auquel ils s'adressent.

Jacques Repussard
Directeur Général

www.irsn.org

Doctrine et synthèse

IRSN
BP 17
92262 Fontenay aux Roses cedex
Fax : +33 (0) 1 58 35 79 62

doc.syn@irsn.fr

//liste des auteurs

Jean-Claude Nénot

Conseiller du Directeur de la stratégie, du
développement et des relations extérieures

Patrick Gourmelon

Directeur de la radioprotection
de l'homme

Avant-propos

La gestion sanitaire des accidents dus aux rayonnements ionisants a longtemps été considérée comme une activité médicale marginale réservée à un petit nombre de spécialistes répartis dans le monde. Ceci s'explique par la rareté historique de ces événements, rareté toute relative d'ailleurs car nombreux furent les accidents radiologiques ou nucléaires couverts par le secret d'Etat comme c'était la règle dans l'ex-URSS, ou restés non identifiés notamment dans les pays en voie de développement. Ainsi sur près d'un demi-siècle, la liste des accidents est restée remarquablement courte et assez confidentielle, à l'exception des plus célèbres d'entre eux, Tchernobyl en Ukraine et Goiânia au Brésil.

Un tel paysage pourrait changer dans un avenir assez proche pour plusieurs raisons : la diversification et la multiplication des dangers, l'évolution récente de la réponse médicale du fait d'une meilleure compréhension de la physiopathologie des irradiations accidentelles et enfin les nouveaux espoirs thérapeutiques dans le domaine de la thérapie cellulaire.

Une diversification et une multiplication des dangers

On observe aujourd'hui une aggravation des dangers liés à l'utilisation des rayonnements ionisants et ce pour trois raisons principales. C'est tout d'abord l'usage des sources de rayonnements ionisants pour de nombreuses applications industrielles. Il existe en Europe plus de 500 000 sources radioactives, dont certaines sont hors d'usage et stockées dans des locaux mal ou non identifiés et que les spécialistes appellent sources orphelines. C'est ensuite un accroissement significatif du nombre d'accidents en milieu médical du fait de l'expansion de l'utilisation des rayonnements ionisants en radiothérapie et de l'apparition de machines et de protocoles de plus en plus complexes à mettre en œuvre. Enfin, l'hypothèse d'actes criminels majeurs faisant appel au détournement de sources radioactives de forte activité doit désormais être prise en compte, en raison notamment du recours possible des organisations terroristes à des modes d'action impliquant un comportement suicidaire de leurs recrues.

Des réponses médicales différenciées

Une des caractéristiques principales des accidents impliquant les rayonnements ionisants est le caractère différencié de la réponse médicale selon le type d'accident. Il faut en effet distinguer trois types de réponse médicale selon qu'il s'agit d'une irradiation externe globale, d'une irradiation externe localisée ou d'une contamination par une substance radioactive. Au plan médical, ces surexpositions accidentelles se traduisent respectivement par :

- Un syndrome aigu d'irradiation nécessitant l'orientation de la victime vers un service hospitalier d'hématologie, en raison du risque d'aplasie de la moelle osseuse, organe particulièrement sensible aux rayonnements ionisants ;
- Des brûlures radiologiques localisées impliquant une très longue hospitalisation dans un centre de traitement des brûlés ;
- Une contamination externe ou interne nécessitant en urgence une décontamination de la victime dès l'intervention des services d'urgence sur le terrain.

L'expression « accident dû aux rayonnements ionisants » est donc insuffisante en elle-même et ce sont les vocables « irradiation globale », « irradiation localisée » et « contamination » qui définissent les trois types d'organisation médicale à déployer sur le terrain.

Cas des irradiations globales

Les connaissances sur la physiopathologie des irradiations accidentelles ont beaucoup progressé au cours de ces dernières années. On est ainsi passé du paradigme classique de défaillance radioinduite d'un organe cible unique (moelle osseuse ou système gastro-intestinal ou système nerveux central) au concept de défaillance multi-organes impliquant les 3 systèmes précédents ainsi que la peau, le poumon, le foie et le rein. Ce changement de paradigme a de très grandes conséquences. La gestion médicale devient plus complexe, le patient irradié ne devant plus être pris en charge uniquement par des spécialistes d'hématologie mais par une équipe pluridisciplinaire rassemblant les grandes spécialités de la médecine, et ce dès l'évènement initial. Les règles de tri des victimes en cas d'accident de grande ampleur, comme pourrait l'être un acte de terrorisme, changent profondément puisqu'une nouvelle catégorie de victimes fait son apparition, à savoir celles qui sont susceptibles de développer par la suite une défaillance multi-organes radioinduite. Enfin, toute la stratégie thérapeutique à mettre en œuvre s'en trouve modifiée. Il existe historiquement deux grandes écoles de pensée sur les traitements des irradiations accidentelles. L'une, soutenue par les Américains, les Japonais et dans une moindre mesure les Allemands, est partisane de la

greffe systématique de moelle osseuse. L'autre portée par les Russes et les Français est opposée à la greffe. Il y avait donc un besoin réel et urgent d'établir un consensus international sur le traitement de l'irradiation accidentelle. L'IRSN, après avoir organisé une conférence de consensus en France sur ce sujet, a participé avec la société European Group for Blood and Marrow Transplantation (EBMT) et l'Université d'Ulm (Allemagne), à l'élaboration d'un consensus européen. Le nouveau concept physiopathologique de la défaillance multi-organes a permis de réconcilier les deux écoles. Le consensus ainsi obtenu propose que la greffe de moelle ne soit pas pratiquée en urgence comme cela a souvent été le cas dans le passé, mais soit systématiquement différée de 2 à 3 semaines après l'accident dans l'attente de la vérification du caractère définitif et irréversible des dommages radioinduits à la moelle osseuse et en l'absence de signes cliniques d'apparition d'une défaillance multiple des organes.

Cas des irradiations localisées

Les irradiations localisées se caractérisent par l'apparition de brûlures radiologiques dont l'évolution clinique est très différente de celle des brûlures thermiques. Alors que les lésions des brûlures thermiques sont définies dans leur extension dès l'évènement initial, les brûlures radiologiques évoluent sur un mode sournois pendant des mois, voire des années, en vagues successives inflammatoires hyperalgiques. Les conséquences en sont, lors des irradiations sévères, une extension imprévisible en surface et en profondeur d'une nécrose irréversible des tissus irradiés cutanés et musculaires. Ces brûlures radiologiques posent un problème difficile pour le diagnostic et le traitement. Si l'accident est méconnu et implique un grand nombre de victimes, l'apparition sur plusieurs semaines d'une « épidémie » de brûlures radiologiques posera un difficile problème de diagnostic, les praticiens n'étant pas suffisamment sensibilisés à ce type de pathologie orpheline. Au plan thérapeutique, il faut souligner l'échec des techniques classiques d'exérèse des tissus nécrosés suivis d'autogreffes de peau dans les cas très sévères où existe un processus morbide auto-entretenu difficile à combattre et qui perdure pendant des années. Récemment de nouveaux espoirs thérapeutiques se dessinent avec l'introduction de la thérapie cellulaire. Dans ce contexte, la greffe de cellules souches mésenchymateuses dont l'intérêt a été mis en évidence par l'IRSN à partir d'expérimentations animales, a été appliquée pour la première fois en 2005 à un patient chilien irradié par une source d'iridium de gammagraphie. Les résultats sont actuellement très prometteurs. Il est aujourd'hui possible d'imaginer que le traitement de certaines brûlures radioinduites, jusqu'à présent strictement chirurgical, fera appel à terme à des protocoles médicaux susceptibles d'apporter au

niveau des tissus lésés des facteurs trophiques cellulaires qui soient capables de les régénérer.

Cas des contaminations

A la différence du cas des irradiations globales et localisées pour lesquelles les doctrines de prise en charge et de conduite thérapeutique sont en pleine évolution, la doctrine de prise en charge médicale des contaminations accidentelles avec présence de victimes blessées, brûlées ou choquées (effet de blast), est clairement établie et reconnue au plan international. Elle se résume à une règle d'or : l'urgence médicale prime sur l'urgence radiologique. La gestion des contaminations accidentelles est essentiellement opérationnelle avec une phase réflexe où les équipes médicales d'urgence doivent déployer sur le site de l'accident un poste médical avancé comprenant des chaînes de décontamination, de déshabillage et de douches. L'objectif est d'effectuer un tri médical des victimes et d'éliminer la radioactivité déposée sur les vêtements et la peau. Si la doctrine de gestion des contaminations accidentelles est simple dans ses principes, elle présente cependant des difficultés de mise en œuvre car elle nécessite une politique dans la durée de formation et d'entraînement des équipes d'intervention et des équipes d'accueil des structures hospitalières.

Au-delà de la phase réflexe, les accidents de contamination se caractérisent par l'apparition d'une crise psychosociale majeure, comme l'a montré l'accident de Goiânia au Brésil. Dans ce cas, la gestion de la crise requiert, outre la mise en place de cellules de soutien psychologique, le déploiement à grande échelle de moyens de mesure pour l'évaluation des doses individuelles reçues qui permettront de quantifier le risque radiologique pour les sujets contaminés.

Les conditions pour une gestion opérationnelle efficace

La diversification des dangers liés aux rayonnements ionisants avec tout particulièrement la nouvelle menace de terrorisme, qui n'est plus de l'ordre de la fiction comme l'a montré la récente intoxication au polonium 210, conduit à penser que désormais la question pertinente n'est plus « est ce possible ? » mais « où ? quand ? et comment répondre ? ». Il serait donc irresponsable de fonder une stratégie nationale ou internationale uniquement sur la prévention des accidents sans se préoccuper de la gestion des conséquences médicales et sanitaires. L'analyse rétrospective des accidents survenus dans les cinquante dernières années et surtout les développements récents signalés dans cet avant-propos démontrent l'importance d'associer étroitement la réflexion

sur les doctrines et le développement de capacités opérationnelles qui sont tous deux indispensables pour une réponse médicale adaptée.

Le retour d'expérience des différents accidents internationaux gérés en France depuis une décennie montre qu'il est capital d'associer des physiciens dosimétristes aux équipes médicales et chirurgicales afin que la stratégie thérapeutique soit définie dans un cadre pluridisciplinaire. Ainsi, dans le cas d'une irradiation globale, ce sont les physiciens qui déterminent si l'irradiation est homogène ou hétérogène, une information clef pour la décision thérapeutique. S'il est démontré que l'exposition est hétérogène, la greffe de moelle est par nature contre-indiquée et il faut dès lors recourir à une stimulation par des facteurs de croissance de la moelle osseuse présente dans les territoires les moins irradiés. De même, dans le cas d'une irradiation localisée, l'exérèse chirurgicale doit dans la mesure du possible être guidée par une reconstitution dosimétrique anatomique préalablement établie par les physiciens dosimétristes.

Ce même retour d'expérience a démontré que la rareté historique des accidents radiologiques ou nucléaires dans le monde a créé dans le domaine de la médecine une situation analogue à celle des maladies orphelines qui ne peuvent pas bénéficier de programmes de recherche soutenus et ciblés. Or, la seule façon de maintenir des experts de qualité sur un sujet qui s'apparente au « désert des Tartares » est de maintenir à long terme une activité de recherche spécifique. C'est le choix qui a été fait par l'IRSN et ce n'est sans doute pas un hasard si plusieurs victimes d'accidents internationaux ont été transférées en France pour y être traitées.

Le maintien d'équipes pluridisciplinaires dont les activités se nourrissent de programmes de recherche sur la pathologie des rayonnements ionisants est donc la condition « sine qua non » pour rendre efficace une gestion médicale opérationnelle des accidents radiologiques et nucléaires. Il appartiendra à l'avenir à ces mêmes équipes pluridisciplinaires d'assurer une formation spécifique de haut niveau à l'adresse des praticiens du monde hospitalier pour former des spécialistes servant à leur tour de relais d'enseignement auprès de l'ensemble du monde médical.

Sommaire

1/ Introduction	14
2/ Définition et classement des accidents	15
3/ Accidents reconnus d'emblée	21
3/1 Gestion simple, victimes en nombre réduit	21
3/2 Gestion médicale délicate	27
3/3 Catastrophes, grand nombre de victimes	29
4/ Accidents méconnus ou connus tardivement	34
4/1 Nombre réduit de victimes	34
4/1/1 Secteur industriel	35
4/1/2 Secteur médical	41
4/1/3 Secteur militaire	42
4/1/4 Actes de malveillance	43
4/2 Nombre important de victimes	44
4/2/1 Secteur médical	44
4/2/2 Secteur industriel	47
4/2/3 Secteur militaire	47
4/3 Conséquences graves pour la population et l'environnement	49
5/ Accidents secrets, d'origine militaire	56
6/ Conclusions	59
6/1 Diagnostic de l'accident	59
6/2 Diagnostic des maladies radioinduites	60
6/3 Traitement de l'accident	60
6/4 Traitement médical de l'accidenté	60
6/4/1 Exposition globale	61
6/4/2 Exposition localisée	62
7/ Glossaire	63
8/ Références	70

Liste des figures

Figure 1 : Répartition du nombre d'accidents radiologiques suivant les domaines d'utilisation des rayonnements.....	17
Figure 2: Accident de Saintes, France (1981) Main droite de l'opérateur qui a ramassé à main nue la source de cobalt 60 (137 TBq) tombée sur le sol. A gauche, aspect clinique trois semaines après l'accident ; à droite, isodoses de la face dorsale, telles que reconstruites trois jours après l'accident grâce à une reconstitution pratiquée avec un fantôme de main en plastique « équivalent tissus » et une source de même géométrie que celle responsable de l'accident, mais d'activité réduite (37 GBq). Photo : J.C. Nénot, Institut Curie, Paris ; schéma : d'après [Nénot, 1990].....	22
Figure 3: Accident de Nesvizh, Belarus (1991) A gauche, position de l'opérateur, telle que supposée par l'équipe médicale, sur la foi des informations fournies par les responsables de l'installation. A droite, reconstitution des isodoses, avec la source supposée totalement en vue de la victime (d'après [IAEA, 1996a] et des informations de l'Institut de Biophysique de Moscou)......	24
Figure 4: Accident de Nesvizh, Belarus (1991) Représentation schématique (élévation, vue de face) du système d'irradiation, montrant la source (2,2 m x 1,2 m, composée de 16 crayons verticaux de cobalt 60 d'une activité totale de 28 PBq au moment de l'accident, correspondant à un débit de dose de 15 Gy s ⁻¹ à 30 cm), les deux contrepoids en plomb, les rails en acier guidant les déplacements des contrepoids et la fosse de stockage à sec. En fait, l'opérateur était situé le long du rail de soutien d'un contrepoids, le plus extérieur par rapport à la source. Il était donc partiellement protégé par ce rail et le contrepoids, à l'exception de la partie inférieure de ses jambes, en vue plus ou moins directe de la source bloquée au début de sa descente vers son emplacement de stockage.....	24
Figure 5 : Accident de Yanango, Pérou (1999) Lésion de la face postérieure de la cuisse droite, deux mois après l'accident (photo : P. Gourmelon).....	27
Figure 6 : Accident de Sétif, Algérie (1978) Plan schématique de la cuisine, montrant les débits de dose (röntgen h ⁻¹ et cGy h ⁻¹ , déterminés par une reconstitution théorique. Les débits de dose sont indiqués aux endroits où les victimes furent irradiées alors qu'elles séjournaient dans la pièce. D'après [Jammet, 1980b].....	36
Figure 7 : Accident de Sétif, Algérie (1978) Isodoses obtenues dans un fantôme, lors de la reconstitution dosimétrique (face à la source) effectuée sur place. A gauche, sujet debout, à droite sujet accroupi.....	37
Figure 8 : Accident de Casablanca, Maroc (1984) Plan de la chambre des parents et de leurs enfants, indiquant l'emplacement de la source par rapport aux victimes. Les débits de dose furent calculés pour une activité de 500 GBq et des ajustements faits pour tenir compte de la décroissance de l'iridium 192.	38
Figure 9 : Accident de Lilo, Georgie (1996-1997) Lésions caractéristiques causées par une source de césium 137, placée dans la poche d'une capote militaire. Exposition prolongée, particulièrement pendant la nuit, quand les gardes-frontières utilisaient la capote comme couverture pour se protéger du froid (photos : P. Gourmelon).....	48
Figure 10 : Accident de Goiânia, Brésil (1987) Brûlure radiologique induite par le césium 137.....	51

- Figure 11 : *A gauche: Epilation permanente à la suite d'une dose reçue de 60 Gy (champ : 15 x 12 cm), pour une métastase d'un cancer du col de l'utérus. Photo : J.C. Nénot 54*
- Figure 12 : *A droite: Séquelles cutanées d'irradiations de colonne vertébrale (31 X 6 cm thoracique, 19 x 6 cm lombaire). Même malade qu'en 11. Noter la solution de continuité entre les deux champs vertébraux. Photo : J.C. Nénot 54*
- Figure 13 : *A gauche : Lésions cutanées permanentes à la suite d'une dose reçue de 58 Gy (champ : 16 x 10 cm), pour côte lytique ; malade âgé de soixante-trois ans. Photo : J.C. Nénot 54*
- Figure 14 : *A droite : Enfant de 3 ans, handicapé moteur grave, muet, à la suite d'une dose reçue de 58 Gy au crâne (champ : 16 x 9 cm), pour une métastase d'un cancer des testicules. Photo : J.C. Nénot 54*
- Figure 15 : *Epilation permanente chez une fillette de six ans, à la suite d'une dose reçue de 63 Gy au crâne (champ : 15 x 12 cm), pour un méduloblastome. Photo : J.C. Nénot 54*

Liste des tableaux

- Tableau 1 : *Exemple de classement d'accidents particulièrement graves, en fonction 1/ des délais entre survenue et reconnaissance, et 2/ des difficultés de gestion (par pays et par année) 20*
- Tableau 2 : *Traitements médicaux et causes de la mort dans quelques accidents mortels..... 61*

1/ Introduction

Depuis la fin de la deuxième guerre mondiale, les utilisations industrielles et médicales des *rayonnements* ionisants ont connu un développement considérable. Des surexpositions accidentelles de personnes, appartenant au milieu professionnel ou membres du public, ont causé des décès et des blessures suivies de séquelles sévères. Le présent rapport dresse le bilan, actualisé en 2006, des accidents graves survenus dans les quatre secteurs civil, industriel, médical et militaire. Son objectif est de fournir une revue explicative et critique des accidents les plus représentatifs qui ont causé des dommages graves aux victimes. La définition de l'accident est prise ici dans un sens relativement restrictif, puisqu'elle correspond aux critères habituellement retenus par les médecins plutôt qu'à ceux considérés par les ingénieurs ; par exemple, l'accident de Three Mile Island, survenu aux Etats-Unis en 1979, qui a causé exclusivement des dommages socio-économiques, n'est pas décrit. Bien que la littérature sur les accidents radiologiques soit particulièrement riche, elle ne doit pas, pour de multiples raisons, être considérée comme exhaustive. Deux ouvrages¹² parus récemment en France fournissent des renseignements sur certains des accidents retenus ci-dessous, mais étant centrés sur des sujets plus généraux – la menace terroriste et la radioprotection – n'analysent pas en détail les causes de l'accident ni n'en dégagent les leçons essentielles. Le rapport analyse, pour chaque accident et chaque fois que des données fiables existent, les raisons de sa survenue, les conséquences pour les victimes et éventuellement pour l'environnement, les actions palliatives entreprises et les traitements médicaux quand ils ont été novateurs. A partir d'un regroupement des accidents présentant des caractères communs, le rapport propose les principales leçons qu'il convient de tirer de ces événements tragiques. Ce rapport s'adresse aux praticiens de la radioprotection en général et ne cible pas particulièrement des experts dans une quelconque spécialité technique ou médicale.

1

Menace terroriste, approche médicale : nucléaire, radiologique, biologique. T. de Revel, P. Gourmelon, D. Vidal et C. Renaudeau Coordinateurs, John Libbey Eurotext Ed., 2005

2

Radioprotection et ingénierie nucléaire, Collection Génie Atomique, EDP Sciences, H. Métivier Coordinateur, 2006

2/

Définition et classement des accidents

Un accident, indépendamment de sa cause, est défini comme un événement fortuit, imprévisible, qui entraîne ou risque d'entraîner des blessures ou des dommages à la santé des personnes directement impliquées. Dans le cas d'accidents causés par les rayonnements ionisants, cette définition demande à être assortie d'un certain nombre de commentaires :

- Les actions de guerre ne peuvent pas entrer dans le cadre de cette définition, pas plus que les suicides ou tentatives de suicide dans la mesure où ils n'altèrent pas la santé de l'entourage des désespérés. En revanche, la situation n'est pas aussi claire pour les actions terroristes ; en effet, cette définition s'applique sans conteste aux victimes, qui doivent faire face à des situations identiques dans les deux cas, qu'il s'agisse d'un accident ou d'un acte malveillant. De plus les conséquences médicales et sanitaires d'un acte terroriste utilisant les rayonnements présentent de fortes similitudes avec celles d'un accident radiologique ou nucléaire. Enfin, les moyens à mettre en œuvre pour gérer la crise sanitaire et ceux nécessaires pour le traitement médical des victimes sont semblables dans les deux cas. Seuls les moyens de prévention diffèrent fondamentalement [ICRP, 2005 ; Nénot, 2006]. C'est pourquoi quelques rares actes de malveillance, perpétrés soit à des fins de vengeance personnelle soit pour des raisons politiques, sont cités dans ce rapport.
- Les accidents dus aux rayonnements ionisants constituent des événements rares. Comme chaque accident possède ses propres caractéristiques, il est vain d'espérer pouvoir tirer des règles génériques, sur la seule base d'un accident isolé, avec pour objectif de prévenir ou mieux gérer de futurs accidents.

- La pathologie radioinduite présente des caractères spécifiques, qui peuvent retarder ou même compromettre la reconnaissance de l'accident ou de sa nature radiologique, et aussi compliquer la tâche des médecins. Par exemple, le délai de survenue de la *symptomatologie clinique*, même dans des cas graves, peut inciter à un optimisme injustifié et entraîner des décisions médicales inadaptées, voire erronées.
- Les rayonnements peuvent induire des maladies extrêmement variées qui dépendent de nombreux paramètres ; les principaux sont : 1/ le niveau de la *dose* reçue, qui conditionne le degré de gravité, 2/ la taille des volumes irradiés (exposition externe du corps entier, *exposition* partielle ou franchement localisée aux membres ou à des segments de membres) ainsi que les organes irradiés, 3/ la nature des rayonnements (toute la gamme existe depuis les rayonnements très pénétrants qui induisent des lésions profondes jusqu'aux rayonnements de très faible énergie qui sont arrêtés par les premières couches de la peau). Ces maladies radioinduites ne nécessitent pas les mêmes spécialistes : une irradiation *aiguë* globale requiert en premier lieu une réanimation hématologique puis des soins spécifiques à chaque organe ou système défaillant, une brûlure radiologique peut nécessiter des actes de chirurgie réparatrice apparentés au traitement des grands brûlés et une contamination interne fait appel à des traitements particuliers.
- La variété des accidents est large. Dans le cas le plus simple, l'accident ne cause qu'une seule victime, la source est connue et identifiée ; le diagnostic de l'accident et celui de la maladie ne présentent pas de difficultés particulières et l'acte médical obéit alors à la déontologie courante. La situation est souvent plus compliquée : victimes en grand nombre, lésions combinées rendant difficile le choix d'une structure d'accueil adaptée, connaissance tardive de l'accident quand les conséquences deviennent visibles, diagnostic malaisé, pronostic incertain et choix thérapeutique difficile ou controversé. Quand la situation accidentelle s'apparente à une catastrophe et si, en plus, les problèmes posés par les victimes sont complexes, les décisions d'ordre sanitaire (préparation de la crise et gestion de l'accident) incombent aux pouvoirs publics.
- La notion d'accident, comme définie plus haut, s'appuie en général sur l'existence de pathologies apparentes d'apparition relativement rapide. C'est vrai quand les rayonnements induisent des effets aigus. C'est beaucoup plus difficile de trancher quand les doses sont insuffisamment élevées pour induire des effets aigus, mais suffisantes pour qu'il demeure un risque d'induction de cancers. La valeur au-dessus de laquelle le risque de cancer radioinduit sera jugé inacceptable dépend de nombreux paramètres, difficiles à définir. De plus, les accidents de grande ampleur, comme tous les événements catastrophiques, d'origine

naturelle ou non, induisent toujours des effets indirects, le plus souvent attribués au stress, qui peuvent aussi concerner des individus qui n'ont pas subi l'exposition accidentelle.

- Enfin le milieu de survenue de l'accident conditionne souvent ses caractéristiques. Le recul sur une cinquantaine d'années montre que le secteur industriel est responsable de 51 % du nombre total des accidents radiologiques graves, suivi par la recherche avec 20 %, le nucléaire civil avec 13 %, la médecine avec 11 % et les activités militaires avec 5 % [*Chambrette, 2001*]. La figure 1 illustre la répartition du nombre d'accidents radiologiques suivant les domaines d'utilisation des rayonnements.

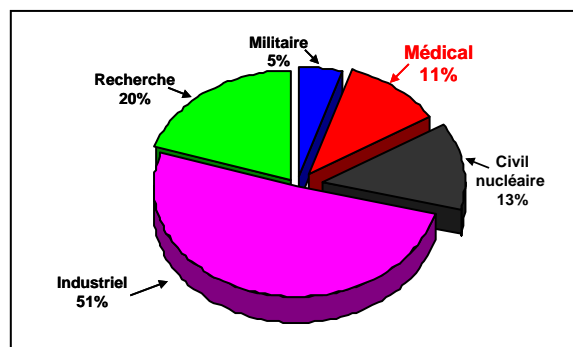


Figure 1 : Répartition du nombre d'accidents radiologiques suivant les domaines d'utilisation des rayonnements.

Le nombre de victimes par secteur n'est pas dans la même proportion. Ainsi, chacun des accidents du secteur industriel ne cause souvent qu'une seule victime : dans le cas des intrusions dans un *irradiateur* de forte puissance, l'issue est fréquemment fatale, alors que pour les petites sources de *gammagraphie* les dommages sont classiquement des brûlures radiologiques localisées ; ces mêmes petites sources peuvent toutefois être causes d'irradiations suffisamment étendues et prolongées pour entraîner la mort, particulièrement dans le cas de sources égarées et trouvées par des membres du public qui ignorent la nature de l'objet trouvé. L'industrie utilise un nombre restreint de types de sources, principalement l'iridium 192 pour la gammagraphie et le cobalt 60 pour les irradiateurs. A l'inverse, dans le domaine médical, les accidents dus à des surdosages lors de radiothérapies impliquent le plus souvent toute une série de patients : l'accident n'est reconnu que lorsque les mêmes symptômes alarmants apparaissent chez plusieurs patients. Les accidents touchant le personnel médical sont plus rares et leurs caractères se rapprochent des accidents qui surviennent en milieu industriel. La médecine fait appel à des sources extrêmement diverses, de natures très différentes : rayonnements gamma du cobalt 60, du césium 137 et de l'iridium 192, rayons X, électrons produits par des *accélérateurs linéaires* ou encore émetteurs β utilisés en médecine nucléaire. Dans le secteur

nucléaire civil, la statistique est faussée par l'accident de la centrale de Tchernobyl, qui est pratiquement le seul accident qui a causé des effets aigus entraînant la mort. Les accidents qui surviennent dans le domaine de la recherche représentent un pourcentage anormalement élevé. La gravité de leurs conséquences est variable, car les causes et les sources sont extrêmement variées ; les accidents survenus dans des réacteurs expérimentaux ont été très souvent mortels. Les accidents survenus dans le secteur militaire constituent un domaine difficile à explorer, en raison principalement du secret dont ils sont entourés ; le risque de sous-évaluer leur nombre et leur gravité ne saurait être ignoré.

Les accidents de *criticité*, causés par une réaction nucléaire en chaîne imprévue, occupent une place à part, en raison de leur fréquence aux débuts de l'ère nucléaire, du nombre élevé de victimes gravement blessées et décédées, et du mystère dans lequel certains étaient maintenus (une partie notable d'entre eux survenait dans des installations militaires secrètes). Depuis 1945, une soixantaine d'accidents de criticité ont été rapportés, causant dix-sept décès. La plupart des accidents de criticité se sont produits aux Etats-Unis et dans l'ex-URSS, dans des réacteurs de recherche, dans des laboratoires sur des assemblages critiques, ou plus rarement dans des installations du cycle du combustible [Vargo, 1999 ; Mettler, 2001a]. Entre les années 1945 et 1980, il y a eu plus d'un accident par an. A partir du milieu des années 60, l'évaluation correcte des paramètres de criticité et l'élaboration précise de codes de calcul se sont traduites par une réduction drastique du nombre de situations pouvant conduire à des états critiques. Depuis 1980, seulement trois accidents de criticité se sont produits, causant quatre décès.

Historiquement, les premières expositions aux rayonnements qui ont causé des dommages graves ont été dues à des pratiques médicales d'une époque où les méfaits des rayonnements étaient méconnus. Ainsi, bien qu'il paraisse difficile de les classer dans une rubrique « accident », certaines complications de ces anciennes pratiques sont comparables à celles d'accidents graves récents. C'est le cas de l'utilisation du thorium 232 comme produit de contraste dans les *angiographies* (le thorostrast) et du radium administré *per os* ou en injection intramusculaire à des fins diverses, entre les années 30 et 50. Des milliers de patients (principalement danois, allemands, portugais, japonais, britanniques et américains) reçurent des doses élevées, qui se sont traduites par des excès de cancers du foie, d'*angiosarcomes*, d'*ostéosarcomes* et de *mésotéliomes* [Stannard, 1988]. Il s'agit aussi du radium utilisé jusqu'en 1933 : le suivi de patients, beaucoup moins nombreux que ceux qui ont reçu du thorostrast, a montré un excès de cancers, le plus souvent osseux [Finkel, 1967]. Au cours des années 40 et 50, avant que la manipulation

des *sources non scellées* soit parfaitement codifiée, des contaminations répétitives du personnel n'étaient pas rares dans les services de médecine nucléaire. Depuis cette période, les accidents sont devenus exceptionnels ; ils sont dus le plus souvent à des erreurs de dosage et concernent les patients. Par exemple, en août 1968, lors d'une exploration hépatique dans un hôpital de l'Etat du Wisconsin aux Etats-Unis, la confusion entre μCi et mCi a été responsable de l'injection d'une quantité d'or 198 mille fois supérieure à celle prescrite qui a conduit au décès de la patiente [Baron, 1969].

Enfin, il convient d'observer la fréquence relative des accidents en fonction du temps et de la nature des conséquences qu'ils causent ; sur les cinq cent soixante accidents recensés entre 1945 et 2001, soixante-dix ont entraîné le décès d'au moins une victime [Chambrette, 2001]. Au total, près de deux cents personnes sont mortes consécutivement à un syndrome *aigu* d'irradiation. Sept accidents ont été particulièrement dramatiques : deux accidents militaires russes de sous-marins (en 1981 avec huit morts et en 1985 avec dix morts), deux accidents liés à la perte d'une source industrielle (en 1982 à Bakou avec cinq morts et en 1984 à Casablanca avec huit morts recensés), deux accidents de radiothérapie (en 1990 à Saragosse et en 1996 à San José avec au moins treize morts dans chacun des deux cas), enfin l'accident de Tchernobyl en 1986, avec vingt-huit morts. La répartition de ces accidents par année de survenue montre que la fréquence augmente avec le temps.

Ces considérations générales permettent de classer et de présenter les accidents radiologiques de plusieurs façons. Chacune présente ses avantages et inconvénients. Les méthodes classiques choisissent volontiers soit l'ordre chronologique, qui permet d'apprécier directement les variations de fréquence en fonction du temps, soit la distinction par secteur d'activités, qui met en évidence les grandes différences entre l'industrie, la médecine et les nucléaires civil et militaire. Comme les accidents radiologiques sont de plus en plus souvent reconnus très tardivement, soit en tant qu'accidents, soit en tant qu'accidents causés par des rayonnements, et comme les gestions « administrative » et médicale présentent des problèmes de gravité variable, plus ou moins faciles à résoudre avec les moyens habituels, il paraît intéressant de faire appel à un classement fondé à la fois sur la façon dont ils ont été découverts et sur les difficultés de leur gestion. Cette approche permet ainsi de distinguer les accidents reconnus d'emblée de ceux qui n'ont été découverts que tardivement. Les accidents gardés secrets pour des raisons militaires ou politiques se situent à part. Dans chacun de ces groupes, il existe des accidents qui ne posent de problèmes particuliers ni dans l'organisation des secours ni dans les domaines sanitaire et médical, des accidents dont la gestion médicale est délicate et des accidents qui

mobilisent des moyens très importants. Le tableau 1 illustre cette classification par des exemples d'accidents choisis pour la gravité de leurs conséquences ; ce choix n'a aucun caractère d'exhaustivité.

	Gestion simple, peu de victimes		Gestion difficile, médicale/technique		Catastrophe, effets graves	
ACCIDENTS RECONNUS D'EMBLÉE	France Norvège Israël Belarus Russie Chili	1981 1982 1990 1991 1997 2005	Pérou Japon	1999 1999	Ukraine	1986
ACCIDENTS MECONNUS ou CONNUS TARDIVEMENT	Mexique Italie Algérie Maroc Salvador Espagne France Vietnam Estonie Egypte Géorgie France France Belgique Sénégal	1962 1975 1978 1984 1989 1990 1991 1992 1994 2000 2001 2004 2004-05 2006 2006	USA UK USA USA Chine Géorgie Panama Pologne	1974-76 1982-91 1985-87 1992 1992 1997 2000-01 2001	Mexique Brésil Costa Rica Thaïlande	1983 1987 1996 2000
ACCIDENTS MILITAIRES et/ou SECRETS			URSS Espagne	1961, 68 1966	URSS Groenland	1957 1968

Tableau 1 :

Exemple de classement d'accidents particulièrement graves, en fonction 1/ des délais entre survenue et reconnaissance, et 2/ des difficultés de gestion (par pays et par année)

Ce tableau et ces considérations appellent trois remarques d'ordre général :

- La fréquence des accidents graves connus ne diminue pas avec le temps. Elle montre plutôt une tendance à l'augmentation.
- Les accidents concernent tous les pays et semblent être sans rapport avec le degré de développement économique.
- Beaucoup d'accidents graves restent sans doute complètement ignorés, puisqu'une proportion notable a été découverte fortuitement ; cette proportion pourrait même augmenter avec le temps.


3/

Accidents reconnus d'emblée

3/1

Gestion simple, victimes en nombre réduit

Les points communs des accidents dont la gestion n'a pas soulevé de difficultés particulières sont : 1/ la connaissance immédiate de l'accident et de ses conditions de survenue, 2/ l'identification sans équivoque des victimes qui souffrent de lésions entrant dans le cadre de la médecine classique, 3/ l'accès à une logistique adaptée. Cependant, une fois la nature radiologique de l'accident reconnue et l'accidenté pris en charge, des erreurs de diagnostic et de traitement sont encore possibles. Des exemples démonstratifs sont fournis par un accident survenu dans un service de radiothérapie, par trois accidents survenus dans des installations industrielles d'irradiation, par un accident de criticité survenu dans une installation militaire et par un accident causé par une petite source de gammagraphie utilisée à des fins industrielles ; chaque fois une erreur humaine a été la cause immédiate de l'accident. Le premier accident est dû à une erreur de manipulation de la source, mais avec sans doute une mauvaise conception de la sûreté de l'appareillage ; il en est résulté des amputations de mains chez les trois employés impliqués. Dans les trois accidents survenus dans des irradiateurs industriels, l'intrusion de l'opérateur dans la salle d'irradiation, alors que la source de cobalt 60 était en position d'irradiation, s'est traduite par des doses de plus de 10 Gy. L'accident survenu dans une installation militaire a été également facilité par un défaut de conception de l'ensemble expérimental destiné à étudier les réactions de *fission*. Dans les trois accidents survenus dans des irradiateurs industriels et dans celui survenu dans une installation militaire, l'opérateur est mort en quelques jours. Le dernier accident causé par une source de gammagraphie industrielle met en évidence les progrès récents de la médecine dans le traitement des lésions radioinduites localisées.

A **Saintes**, France (2 avril 1981), lors du chargement d'une source neuve de cobalt 60 de 137 TBq (3 700 Ci), trois opérateurs (un technicien chevronné, son assistant et un chauffeur manutentionnaire) ont été gravement exposés ; la source était restée coincée dans le conteneur de chargement et la confusion entre la source réelle et une source fictive présente dans le barillet de l'appareil de chargement pour son bon équilibrage a causé la chute sur le sol de la source réelle. Le technicien, malgré ses vingt-cinq ans d'expérience et sa connaissance des dangers, a immédiatement remis à mains nues la source à sa place dans l'appareil. Son assistant, qui devait récupérer la source fictive, a eu les deux mains fortement exposées, lors de leur contact avec la tête de chargement, dans laquelle la source était restée coincée. La reconstitution dosimétrique pour la main droite de l'opérateur a montré que la courbe *isodose* 25 Gy passait au niveau de la face interne du poignet et à la base des doigts pour la face dorsale 1. La figure 2 permet de comparer la reconstitution des doses reçues par la main droite de cette victime, telle qu'elle a été effectuée dès les premiers jours, et l'état clinique de la même main au bout de trois semaines. Les doses reçues par la main gauche, bien que moins élevées que celles reçues par la main droite, étaient largement suffisantes pour entraîner la nécrose de tous les tissus de la main. La situation était encore pire pour l'assistant, dont les deux mains avaient reçu des doses supérieures ou très supérieures à 25 Gy. Le chauffeur avait reçu des doses élevées à une seule main, sans que l'on n'ait jamais pu en comprendre la raison. Il en est résulté l'amputation des deux mains des deux premiers et l'amputation d'une partie importante de la partie préhensible de la main droite du troisième.



L'isodose 25 Gy est particulièrement intéressante car elle indique la frontière entre les téguments et tissus sous-jacents qui développeront une épithélite exsudative, réversible, et ceux qui évolueront inmanquablement vers une nécrose, qui exige un traitement chirurgical. Au plan du pronostic, la détermination de l'isodose 25 Gy permet de prendre les décisions thérapeutiques appropriées avant l'apparition de signes cliniques patents et de complications, notamment infectieuses.

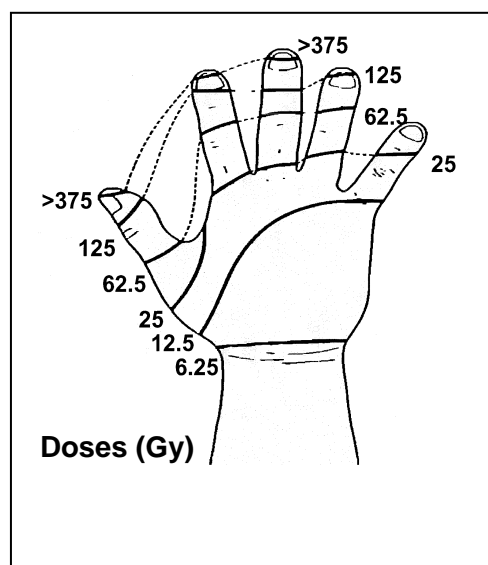


Figure 2: Accident de Saintes, France (1981)

Main droite de l'opérateur qui a ramassé à main nue la source de cobalt 60 (137 TBq) tombée sur le sol. A gauche, aspect clinique trois semaines après l'accident ; à droite, isodoses de la face dorsale, telles que reconstruites trois jours après l'accident grâce à une reconstitution pratiquée avec un fantôme de main en plastique « équivalent tissu » et une source de même géométrie que celle responsable de l'accident, mais d'activité réduite (37 GBq). Photo : J.C. Nénot, Institut Curie, Paris ; schéma : d'après [Nénot, 1990]

A **Kjeller**, Norvège (2 septembre 1982), un employé, dont l'expérience professionnelle était d'une trentaine d'années, a outrepassé les consignes et a été exposé directement à la source de cobalt 60 de 2,4 PBq (65 000 Ci) ; il est mort d'insuffisance rénale aiguë au bout de treize jours, sur un fond d'*aplasie* profonde [*Stavem, 1995*]. L'évolution hématologique et l'examen par *résonance paramagnétique électronique* (RPE) d'objets portés par la victime indiquaient une dose moyenne d'environ 20 Gy.

A **Soreq**, Israël (21 juin 1990), un employé a violé deux consignes pour pénétrer dans la chambre d'irradiation ; il a été exposé à la source de cobalt 60 de 12,6 PBq (340 000 Ci) [*IAEA, 1993*]. La dose a été rapidement évaluée entre 10 et 20 Gy. Un traitement par facteur de croissance hématopoïétique (GM-CSF) a été initié six heures après l'irradiation. Une greffe de moelle a été pratiquée le quatrième jour avec la moelle du frère de la victime, stimulée par deux *facteurs de croissance* (GM-CSF et IL-3). Le patient est mort trente-six jours après l'accident d'un syndrome digestif grave et de défaillance respiratoire.

A **Nesvizh**, Belarus (26 octobre 1991), dans un irradiateur équipé d'une source de cobalt 60 de 28,1 PBq (760 000 Ci), l'employé a aussi violé toute une série de barrières physiques et s'est retrouvé en vue directe de la source de cobalt 60 ; la gravité de l'irradiation a été immédiatement reconnue et la victime transportée dans des délais très courts à Moscou [*IAEA, 1996a*]. La figure 3 montre la position de l'opérateur telle qu'elle a pu être reconstituée par les spécialistes de l'hôpital n°6 de Moscou, sur les dires de la victime et des responsables de l'installation. La dose moyenne a été évaluée à plus de 10 Gy, avec cependant une distribution inégale dans l'organisme, en raison de la courte distance entre la source et la victime. Les médecins, qui avaient l'expérience malheureuse des traitements héroïques pratiqués chez les victimes de l'accident de Tchernobyl, ont refusé d'envisager une transplantation de moelle, en raison d'une possible restauration hématologique spontanée et des risques élevés d'une transplantation. Le patient a été traité par facteurs de croissance (GM-CSF et IL-3) et a restauré son *hématopoïèse* en quelques semaines. Cependant la détérioration de tous les autres systèmes fut rapidement dramatique ; un syndrome de défaillance multiviscérale, compliqué par des brûlures étendues, a entraîné la mort du patient cent treize jours après son irradiation. Une analyse de l'accident par une équipe internationale, pratiquée un an plus tard, a démontré que la première reconstitution des conditions d'exposition était fautive : une partie du corps de l'opérateur avait été relativement protégée par un des deux contrepoids en plomb servant au déplacement vertical de la source et un gros rail métallique guidant ce contrepoids ; de plus, la source avait déjà amorcé sa descente; du fait de cette position, la partie inférieure de la source dépassait les contrepoids, qui ne faisaient

plus office d'écran pour les membres inférieurs de l'opérateur. L'exposition a donc été encore plus hétérogène que ne l'avaient supposée les spécialistes de Moscou lors de leurs calculs de doses. La figure 4 schématise l'ensemble du système d'irradiation et explicite les causes de l'hétérogénéité de l'exposition de la victime.

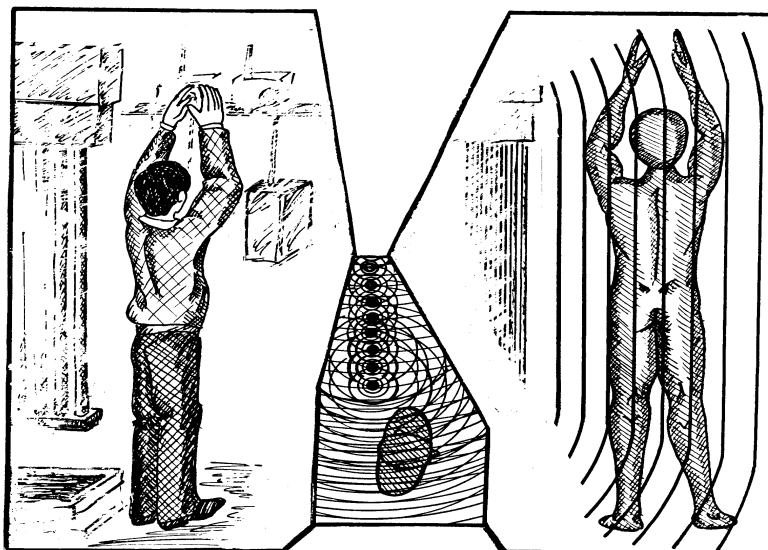


Figure 3: Accident de Neshvitz, Belarus (1991)
A gauche, position de l'opérateur, telle que supposée par l'équipe médicale, sur la foi des informations fournies par les responsables de l'installation. A droite, reconstitution des isodoses, avec la source supposée totalement en vue de la victime (d'après [IAEA, 1996a] et des informations de l'Institut de Biophysique de Moscou).

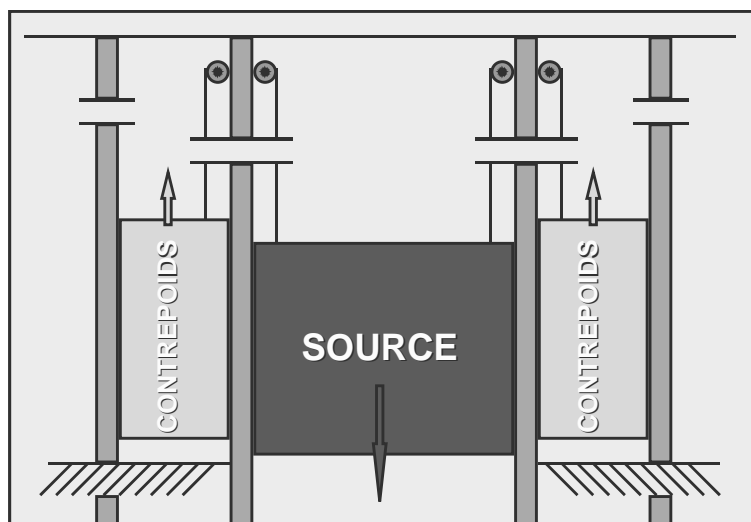


Figure 4 : Accident de Neshvitz, Belarus (1991)
Représentation schématique (élévation, vue de face) du système d'irradiation, montrant la source (2,2 m x 1,2 m, composée de 16 crayons verticaux de cobalt 60 d'une activité totale de 28 PBq au moment de l'accident, correspondant à un débit de dose de 15 Gy s⁻¹ à 30 cm), les deux contrepoids en plomb, les rails en acier guidant les déplacements des contrepoids et la fosse de stockage à sec. En fait, l'opérateur était situé le long du rail de soutien d'un contrepoids, le plus extérieur par rapport à la source. Il était donc partiellement protégé par ce rail et le contrepoids, à l'exception de la partie inférieure de ses jambes, en vue plus ou moins directe de la source bloquée au début de sa descente vers son emplacement de stockage.

A **Sarov**, Russie (17 juin 1997), dans le centre militaire d'Arzamas-16, des erreurs de manipulation sur un assemblage d'uranium ont causé une excursion critique, exposant l'employé à un flux neutronique élevé [IAEA, 2001a]. La dose moyenne a été estimée à environ 15 Gy, avec certaines régions du corps ayant reçu jusqu'à 60 Gy. La victime est morte au cours du troisième jour suivant l'accident.

Au **Chili** (15 décembre 2005) trois ouvriers ont été en contact avec une source d'iridium 192, perdue la veille sur un chantier à la suite d'une opération de gammagraphie. Un des ouvriers fut grièvement exposé, particulièrement au niveau d'une main et d'une fesse, après qu'il eut manipulé la source et l'eut placée dans une poche arrière de pantalon, dans laquelle elle a séjourné environ quinze minutes. En raison de la gravité de l'évolution des lésions, cet ouvrier fut évacué en France à l'hôpital Percy, deux semaines après l'accident. La lésion fessière a été opérée début janvier 2006 ; la zone d'intervention avait auparavant été délimitée grâce à une modélisation dosimétrique pratiquée par l'IRSN. Les lésions de la main ont profité d'un traitement novateur, consistant en l'administration locale de *cellules souches mésenchymateuses* originaires de sa moelle osseuse (*autogreffe*), cultivées en présence de facteurs de croissance spécifiques. En quelques semaines, les résultats furent encourageants : cicatrisation des lésions des doigts et disparition de la douleur. Cette thérapeutique a permis d'éviter un traitement chirurgical, lequel se traduit souvent par l'amputation des extrémités exposées à de tels niveaux de doses [Gourmelon, 2006 ; Jeanblanc, 2006]. Quand, moins de six mois après son accident, la victime a regagné son pays, les lésions des mains et de la fesse étaient en bonne voie de guérison.

Les principales leçons de ces accidents sont les suivantes :

- Dans le cas des expositions globales, la distribution de l'exposition est plus déterminante pour les décisions thérapeutiques que la dose moyenne telle qu'elle est évaluée classiquement. La greffe de cellules souches hématopoïétiques d'origines diverses (moelle osseuse, sang périphérique, sang de cordon ombilical, foie fœtal, cellules souches CD34+ purifiées) est indiquée uniquement dans les cas d'irradiation homogène et dans une gamme étroite de doses. Ceci souligne l'importance pour les médecins de s'appuyer sur des données physiques, telles que celles obtenues par une reconstitution fiable de l'accident. D'une façon plus générale, il s'avère que les premières informations, même les plus élémentaires, sont souvent fausses. Avant de prendre des décisions qui peuvent être lourdes de conséquences pour le patient (décision irréversible de pratiquer une greffe, par exemple), il est impératif de s'assurer de la véracité de tous les paramètres de la surexposition. Dans le doute, les données cliniques sont prioritaires dans le choix des décisions d'ordre thérapeutique.
- La moelle osseuse ne peut pas être considérée comme un organe isolé, puisque l'irradiation induit des effets interdépendants multiples, dont la chronologie d'apparition est conditionnée par les dynamiques cellulaires. La cascade des défaillances successives des différents systèmes et organes représente un des problèmes médicaux les plus difficiles à résoudre. Au cours des décennies passées, cet aspect des grandes irradiations était occulté par le fait que les victimes ne dépassaient pas le cap de l'aplasie profonde.
- Bien qu'il soit difficile d'évaluer précisément le rôle des facteurs de croissance hématopoïétiques dans la stimulation des cellules résiduelles de l'hôte, on peut conclure que ces facteurs accélèrent la restauration autonome (accident de Nesvizh) et, en cas de greffe, facilitent la prise rapide du *greffon* en contribuant à la maturation des cellules du donneur (accident de Soreq).
- Le traitement des lésions occasionnées par les surexpositions locales a beaucoup progressé ; le cas récent de la victime chilienne traitée avec succès à l'aide d'une autogreffe de cellules souches mésenchymateuses, en constitue un exemple démonstratif.
- Enfin et surtout, ces accidents démontrent l'importance du facteur humain dans la genèse des accidents. Chaque fois, le respect de règles simples, qui le plus souvent font appel au simple bon sens, aurait évité des conséquences graves.

3/2

Gestion médicale délicate

La gestion médicale du traitement des accidentés devient délicate dès que des difficultés d'ordre thérapeutique surviennent, en raison de la nature ou de la gravité des lésions. Deux exemples récents sont fournis par un accident avec une source de gammagraphie et un accident de criticité, tous deux survenus en 1999.

A **Yanango**, Pérou (20 février 1999), une source industrielle d'iridium 192 de 1,37 TBq (37 Ci), perdue sur un chantier, a été ramenée par un employé à son domicile ; elle n'a été retrouvée qu'après dix heures de recherches [IAEA, 2000a]. Les doses aux tissus de la cuisse ont été estimées entre 10 et 30 Gy, avec 25 à 30 Gy au nerf sciatique, 10 à 15 Gy à l'artère fémorale et environ 20 Gy au fémur. La figure 5 montre l'état clinique de la cuisse irradiée deux mois après l'accident. Sur la foi de la reconstitution des doses, des traitements faisant appel aux techniques les plus modernes utilisées pour le traitement des grands brûlés furent pratiqués en France (hôpital Percy) où la victime fut évacuée au bout de trois mois. Il a été fait appel à un substitut cutané naturel transformé. Ce traitement n'a apporté qu'une amélioration transitoire. Une rechute dramatique est survenue six mois plus tard, avec des lésions profondes au niveau du bassin, que ni l'évolution clinique antérieure ni la dosimétrie ne laissaient prévoir. Un an après l'accident, la victime était dans un état désespéré, avec des lésions nécrotiques évolutives du périnée et mise à nu de l'ischion. Depuis lors, son état n'a fait qu'empirer.



Figure 5 :
Accident de Yanango, Pérou (1999)
Lésion de la face postérieure de la cuisse droite, deux mois après l'accident (photo : P. Gourmelon)

A **Tokai-Mura**, Japon (30 septembre 1999), trois travailleurs d'une usine de fabrication de combustible ont subi une exposition mixte gamma-neutrons (dans un rapport d'environ 60/40) lors d'une opération de dissolution d'oxyde d'uranium [IPSN, 1999]. La masse de 16 kg d'*uranium enrichi* à 18,8 % en uranium 235, qui se trouvait dans une cuve de décantation (diamètre interne de 45 cm, hauteur 61 cm, refroidie par un circuit d'eau dans sa partie inférieure) dépassait largement la masse autorisée de 2 kg et la masse minimale critique de 5,5 kg (pour l'uranium enrichi à 18,8 %). Deux patients ont présenté une aplasie grave compliquée par des brûlures profondes et étendues. Les soins médicaux ont fait appel aux techniques les plus modernes. La victime la plus gravement atteinte (plus de 10 Gy) a été traitée dès le premier jour par un facteur de croissance hématopoïétique (G-CSF). Une semaine plus tard, une *allogreffe* de *cellules souches hématopoïétiques* a été pratiquée. La deuxième victime (plus de 5 Gy) a aussi été traitée d'emblée par un facteur de croissance (GM-CSF) et a reçu au neuvième jour une greffe de cordon ombilical, qui s'est révélée d'une efficacité limitée, puisque la propre moelle du patient s'est reconstituée en partie en quelques semaines [IAEA, 1999]. Malgré leurs effets bénéfiques sur l'hématopoïèse, ces deux traitements n'ont pas pu enrayer la survenue d'un syndrome de défaillance multiviscérale, compliqué par des brûlures radiologiques étendues, qui ont entraîné la mort du premier patient en quatre-vingt-trois jours et celle du second en deux cent onze jours. Le troisième irradié, dont la dose a été estimée inférieure à 3 Gy, a aussi reçu un facteur de croissance (G-CSF) ; il a survécu sans rencontrer de problèmes que les moyens classiques de la médecine moderne n'aient pu surmonter.

Ces deux accidents permettent de tirer les leçons suivantes :

- La reconstitution dosimétrique, quand elle repose sur des informations sûres, comme celle pratiquée pour l'accident de Yanango, apporte aux médecins des éléments d'appréciation irremplaçables ; elle permet de prendre au bon moment les décisions opportunes, évitant ainsi au patient un grand lot de souffrances. Cependant, elle ne peut pas préjuger de l'évolution clinique, en particulier des rechutes ou des lésions tardives d'organes vitaux.
- L'efficacité des nouvelles thérapeutiques, comme celles utilisées pour les victimes de Tokai-Mura, ne doit pas faire oublier qu'un irradié est un polytraumatisé et que les greffes de cellules hématopoïétiques, quelles qu'en soient l'origine et l'importance de leurs effets secondaires, ont des indications très limitées dans les accidents d'irradiation.

- Le même accident montre que les irradiations mixtes avec une composante neutronique importante provoquent des lésions particulières difficiles à gérer.
- Le facteur humain joue un rôle très important dans la genèse des accidents. Il est notamment source d'erreurs graves de jugement, entraînant des prises de décisions lourdes de conséquences, toujours étonnantes chez des techniciens chevronnés.

3/3

Catastrophes, grand nombre de victimes

L'exemple type de catastrophe est l'accident survenu à la centrale nucléaire de **Tchernobyl**, Ukraine (26 avril 1986). Les conséquences de cet accident dépassent l'aspect strictement médical ; en effet, trois grandes régions de l'ex-Union Soviétique ont été contaminées par les produits radioactifs qui se sont échappés de la centrale accidentée, et ce, à de grandes distances [*Poiarkov, 2001*]. Ainsi, des surfaces importantes de trois territoires de l'Ukraine, du Belarus et de la Russie (correspondant à plus de sept millions d'habitants) ont présenté des dépôts de césium 137 supérieurs à 37 Bq par m² (1 Ci par km²) : 1/ la région comprise dans un cercle approximatif de 100 km de rayon autour de la centrale, 2/ la région de Gomel, de Mogilev et de Briansk à environ 200 km au Nord-Nord-Est, 3/ la région de Kaluga, Tula et Orel à 500 km au Nord-Est. Deux radionucléides ont soulevé des problèmes sanitaires, tant à cause de leurs effets que des quantités rejetées : le césium 137 avec 85 PBq (2,3 10⁶ Ci) rejetés et l'iode 131 avec 1 760 PBq (47,5 10⁶ Ci) rejetés. Dans la semaine qui a suivi l'accident, il a été procédé à l'évacuation des habitants des localités des environs, soit plus de 135 000 personnes, qui ont dû être relogées ultérieurement. Entre les années 1986 et 1990, environ 645 000 personnes (les « liquidateurs », selon la terminologie russe) ont été employées sur le site et ses environs pour procéder à son assainissement (décontamination, restauration du site jusqu'à 30 km, construction du sarcophage, stockage des déchets, etc.). Leurs doses ne sont connues le plus souvent que très approximativement ; elles semblent se situer entre 50 et 250 mSv (avec une moyenne à 100 mSv). Toutefois les intervenants des premiers jours ont certainement reçu des doses nettement plus élevées (jusqu'à 750 mSv). Les conséquences sur la santé concernent essentiellement trois catégories de personnes ; dans l'ordre décroissant des doses reçues, ce sont les intervenants immédiats (personnel de la centrale, pompiers et sauveteurs), les « liquidateurs » et la population en général.

Les traitements médicaux prodigués aux premiers intervenants, qui ont payé un très lourd tribut, sont riches d'enseignements. Les plus fortes doses ont été reçues par les six cents pompiers des premières heures, dont cent trente-quatre ont rapidement présenté des signes évidents d'un syndrome aigu d'irradiation. Parmi ces victimes, vingt individus ont reçu plus de 6 Gy, vingt et un entre 4 et 6 Gy, cinquante-cinq entre 2 et 4 Gy et cent quarante entre 1 et 2 Gy. Des traitements héroïques furent tentés pour les individus les plus gravement atteints : greffe de moelle osseuse chez treize victimes et greffe de foie fœtal chez six autres, dont l'aplasie profonde ne permettait pas le moindre *typage*, examen préalable indispensable pour une greffe de moelle. Sur les dix-neuf transplantés, seuls deux ont survécu [Gale, 1986, 1987, 1988 ; Guskova, 1987, 2001 ; UNSCEAR, 1988 ; Baranov, 1990]. Il est cependant impossible d'en tirer des conclusions définitives sur l'inefficacité de ce traitement, car les blessés souffraient de brûlures étendues graves qui assombrissaient le pronostic. Les brûlés graves étaient au nombre de cinquante-six ; onze en sont morts. Parmi les blessés les plus atteints, treize ont eu des lésions pulmonaires et dix-huit ont souffert d'un syndrome digestif. En tout, dans les semaines qui ont suivi l'accident, vingt-huit individus sont morts des suites directes de leur irradiation lors de l'intervention. Trois autres intervenants sont morts au début de l'accident, à la suite de traumatismes. Au cours de la période 1986-1998, onze décès ont été enregistrés parmi le personnel d'intervention : huit décès sont dus à des maladies qui, de par leur nature, ne peuvent pas être liées à l'accident, deux à des maladies précancéreuses et un à une leucémie aiguë [UNSCEAR, 2000].

Indépendamment des incertitudes sur les doses reçues par les « liquidateurs », souvent surévaluées en raison des avantages sociaux et des compensations liées au statut de « liquidateur », les données issues du suivi de ces travailleurs sont d'interprétation difficile, notamment à cause de l'éclatement de l'URSS, qui a rendu nombre de « liquidateurs » à leurs pays d'origine. Un excès de leucémies a été annoncé en 1997 chez les « liquidateurs » russes, sans qu'aucun rapport crédible ne l'ait étayé depuis. Au cours de la décennie qui a suivi l'accident, le taux de mortalité constaté chez les « liquidateurs » n'a pas excédé celui d'un groupe présentant les mêmes caractéristiques (sexe, âge, nationalité). Parmi les 27 000 décès dus à des causes naturelles constatés entre 1986 et 1995, les « blessures et intoxications » ont représenté 54 %, les causes cardio-vasculaires 20 % et les tumeurs environ 15 % [Ivanov, 1994]. Cette distribution des causes de mortalité est tout à fait comparable à celle des populations locales non exposées.

Parmi la population, un excès de cancers de la thyroïde de l'enfant est apparu en 1991 dans les régions particulièrement touchées par les

retombées des premiers jours, [Williams, 1996]. Entre 1990 et 1998, le nombre total de cancers de la thyroïde détectés en Ukraine, en Belarus et en Russie chez les enfants qui avaient moins de dix-huit ans lors de l'accident a été d'environ 1800 [Tronko, 1999 ; Ivanov, 1999 ; UNSCEAR, 2000]. Ce chiffre correspond à une multiplication du taux naturel de ce cancer, très rare chez l'enfant, par un facteur entre 10 et 100. Dix ans après l'accident, il a été estimé que le nombre total de cancers de la thyroïde pourrait atteindre 10 000 cas en cas d'augmentation régulière avec le temps, mais il est impossible d'indiquer une valeur moyenne vraisemblable [Cardis, 1996 ; Nénot, 1996]. Les dernières estimations récemment publiées confirment ces prévisions : les organisations de l'ONU compétentes dans le domaine de la santé publique estiment le nombre de cancers de la thyroïde diagnostiqués entre 1992 et 2000 à environ 4 000 [IAEA, 2005] ; le rapport le plus récent fait état de 4 837 cas décelés en Ukraine et Belarus, soit un total d'environ 5 000 en ajoutant les cas décelés en Russie [Cardis, 2006]. Un excès de l'incidence des cancers de la thyroïde est aussi constaté chez les adultes dans les trois pays. Cet excès semble concerner plus particulièrement les adultes de plus de cinquante ans et les femmes plus que les hommes. Il est encore difficile d'attribuer cette augmentation chez l'adulte à l'accident de Tchernobyl, puisque le même phénomène est observé dans les pays occidentaux où il n'est pas attribué à l'accident, mais aux progrès constants de la détection de ce type de cancer. De façon globale, aucune augmentation significative des taux des cancers des organes solides n'a été mise en évidence. La même observation s'applique au taux des leucémies [UNSCEAR, 2000].

Les conséquences radiologiques de l'accident de Tchernobyl sur la santé des populations doivent être dissociées des effets qui ont été causés ou amplifiés par les changements radicaux d'ordre social, politique et économique, qui ont eu lieu en Union Soviétique au même moment. La période post-accidentelle a coïncidé à partir de 1987 avec la période de restructuration de la «*Perestroïka*», qui a entraîné une chute brutale de tous les indices économiques, comparable à celle constatée dans des pays en guerre. Cette période a même été qualifiée de façon imagée de «*Katastroïka*» [Ellman, 1994]. L'effondrement économique a eu un impact significatif sur les taux de mortalité et de morbidité. En Russie, le taux brut de mortalité est passé de 488 pour 100 000 en 1990 à 741 pour 100 000 en 1993, soit une augmentation de 52 % ; en 1993 l'espérance de vie des hommes est tombée à cinquante-neuf ans, soit six ans de moins qu'en 1987. Cette détérioration générale de la santé de la population russe depuis 1987 se reflète dans les autres pays de l'ex-Union Soviétique. Si l'on néglige cette augmentation globale de la morbidité et de la mortalité, l'examen isolé des statistiques sur les populations exposées du fait de l'accident peut aboutir à la fausse

conclusion que ces effets sont en rapport direct avec l'accident. C'est sans doute pourquoi de nombreuses affections, connues pour ne pas être induites par les rayonnements, ont été attribuées à tort à l'accident de Tchernobyl.

La détresse et l'état d'anxiété provoqués par l'accident eurent de nombreuses causes, parmi lesquelles les ruptures sociales et économiques causées par les évacuations et les relogements, les restrictions de l'utilisation agricole des terres et la pénurie de produits alimentaires « propres ». Au premier rang, se situe l'incertitude dans laquelle était la population quant aux effets à long terme des rayonnements. Un point commun à tous les désastres est qu'ils sont générateurs de stress et que les individus qui souffrent du stress développent tôt ou tard des symptômes. Le climat psychologique bien documenté de l'après-Tchernobyl a eu des effets marqués sur la santé et la qualité de la vie de millions de personnes, qui se sont ajoutés à la tendance vers la détérioration de la santé qui prévaut dans l'ex-Union Soviétique. Il était reconnu en 1992 que la peur des rayonnements, qui a causé une véritable épidémie psychique, a sans doute fait plus de mal que les rayonnements eux-mêmes [*Nénot, 1994a*].

Les principales leçons à tirer de l'accident de Tchernobyl sont les suivantes :

-
- **La gestion médicale d'un grand nombre de victimes est très délicate (237 diagnostics de syndrome aigu d'irradiation ont été posés à Tchernobyl). Un des premiers problèmes qui se pose est l'orientation des victimes vers des structures hospitalières adaptées. Il n'existe pas de solution miracle : sans une préparation minutieuse et des plans d'urgence prenant en compte des situations variées et vraisemblables, la situation n'est pas maîtrisable. La même remarque s'applique à la protection de la population. Mettre à l'abri la population, lui procurer dans des délais convenables de l'iode stable à titre prophylactique et mettre en œuvre les moyens d'évacuation soulèvent des problèmes d'ordres logistique, social, psychologique et économique.**
-

-
- Les espoirs mis dans les transplantations de cellules souches hématopoïétiques ont été déçus. Parmi les raisons des échecs, il faut retenir que les expositions étaient hétérogènes et autorisaient l'espoir d'une régénération spontanée de la moelle. Ces échecs ont conduit à réviser les indications des greffes pour les victimes de surexposition globale. La déception des spécialistes qui ont participé au traitement des victimes de l'accident de Tchernobyl s'est exprimée de façon très claire : « la transplantation de moelle a des indications limitées dans le traitement des irradiés accidentels et doit être considérée comme un mode de traitement exceptionnel et potentiellement dangereux » [*Gale, 1986, 1987 ; UNSCEAR, 1988, Baranov, 1990*].
 - L'excès de cancers de la thyroïde chez les enfants aurait été évité si la population avait bénéficié en temps voulu d'une distribution prophylactique d'iode stable ; la polémique sur la réalité de ces cancers aurait aussi été évitée si des contrôles appropriés avaient été effectués et les résultats des mesures rendus transparents. Les ressources diagnostiques et thérapeutiques nécessaires pour traiter convenablement les malades requièrent un renforcement des moyens médicaux dévolus à la détection et au traitement des cancers de la thyroïde.
 - L'apparition de l'excès de cancers de la thyroïde chez les enfants a immédiatement soulevé une polémique, qui n'aurait pas existé s'il ne s'était pas développée une crise de confiance envers les autorités et si le suivi nécessaire de cette population à risque avait été mis en place en temps voulu.
 - Les conséquences directes d'un accident radiologique de grande ampleur ne sont pas les seules à prendre en compte, particulièrement pour la préparation des plans d'intervention ; les conséquences de l'accident de Tchernobyl non liées directement à l'exposition de la population aux rayonnements l'emportent sans doute, et de loin, sur les conséquences de l'irradiation. Pour avoir négligé ce point important, pourtant connu et parfaitement décrit avant l'accident, les autorités sanitaires et les milieux scientifiques internationaux se sont souvent trouvés pris en défaut, et leurs interprétations variées et discordantes ont profondément entaché leur crédibilité.
-

4/ Accidents méconnus ou connus tardivement

Le nombre d'accidents dont l'origine radiologique est identifiée par hasard semble augmenter de façon régulière avec le temps. Il est permis de s'interroger sur le nombre d'accidents graves dont la cause radiologique demeure inconnue et dont les conséquences sont attribuées à des causes plus classiques. C'est souvent le caractère particulier des pathologies évolutives présentées par des malades qui permet à des médecins avertis d'évoquer et de rechercher la cause radiologique de l'accident.

4/1

Nombre réduit de victimes

Les accidents qui fournissent des exemples de cette situation sont très nombreux, qu'il s'agisse de sources industrielles ou de sources médicales. Les quinze exemples présentés ci-dessous sont représentatifs en nombre des accidents du secteur industriel (huit accidents causés par des sources de cobalt 60 ou d'iridium 192 et deux par des accélérateurs linéaires), du secteur médical (deux accidents causés par des sources de cobalt 60 et un par un accélérateur linéaire) et du secteur militaire (deux accidents causés par des sources de césium 137 et de strontium 90). Ils sont décrits brièvement ci-dessous, en les regroupant par secteur (industriel, médical, militaire).

4/1/1

Secteur industriel

Dans la ville de **Mexico** (date de l'évènement initiateur : 21 mars 1962), une famille entière a été décimée par l'exposition à une source industrielle de cobalt 60 de 200 GBq (5,4 Ci), trouvée dans une décharge et ramenée à la maison [Andrews, 1963 ; Martinez, 1964]. Un enfant de dix ans est mort en avril, sa mère en juillet, sans que la cause ait été identifiée. Un mois plus tard, après le décès d'une fillette de trois ans de la même famille, la cause a enfin été identifiée. Un autre membre de la famille est décédé en octobre, alors que le chef de famille a dû sa survie au peu de temps qu'il passait à la maison.

A **Brescia**, Italie (13 mai 1975), les symptômes (nausées, vomissements, céphalée, fièvre, érythème de la face, conjonctivite) présentés par le manœuvre d'une installation agricole d'irradiation de céréales, immédiatement après son entrée dans la chambre d'irradiation pour dégager des sacs bloqués sur le tapis roulant, ont d'abord été attribués à des insecticides. Après son admission à l'hôpital, son exposition à l'une des quatre sources de cobalt 60 de 500 TBq (13 500 Ci) est restée ignorée pendant plus de deux jours. Les médecins de l'hôpital régional où la victime fut transférée quand l'origine radiologique de ses troubles fut fortement suspectée, craignant d'être irradiés par leur patient, l'entourèrent d'un mur constitué de briques de plomb. Le quatrième jour, la gravité de l'irradiation devint évidente et l'évacuation de la victime vers l'Institut Curie à Paris fut décidée. La dose moyenne à la moelle osseuse, évaluée à 12 Gy, présentait une distribution très hétérogène avec un gradient allant de 8 Gy au bassin à près de 30 Gy au cou [Jammet, 1980a]. La victime est morte le treizième jour.

A **Setif**, Algérie (5 mai 1978), le diagnostic de l'accident causé par une source d'iridium 192 de 925 GBq (25 Ci) récupérée par une famille n'a été effectué que plus d'un mois après le début de l'irradiation aiguë de tous les membres de la famille [Jammet, 1980b ; Mettler, 2001b]. Après sa chute d'un camion, la source avait été récupérée par deux jeunes frères (trois et sept ans) qui l'utilisèrent comme jouet pendant quelques heures, avant de se la faire confisquer par leur grand-mère, à la suite de disputes. La source se retrouva enfouie dans un panier où étaient stockés les légumes verts destinés aux repas familiaux, suspendu au mur de la cuisine et servant de dossier à l'aïeule. Pendant trente-huit jours, cette dernière fut la plus gravement exposée, en raison de la courte distance qui la séparait de la source et des temps prolongés qu'elle passait à préparer les repas. Deux jeunes femmes de vingt et dix-neuf ans faisaient des séjours fréquents dans la cuisine ; leurs distances à la source étaient comprises entre 0,80 et 1,50 m et leurs expositions duraient de six à huit

heures par jour. Les deux plus jeunes sœurs (dix-sept et quatorze ans) faisaient des séjours plus occasionnels et moins longs que ceux de leurs sœurs aînées. Les hommes de la famille ne furent quasiment pas exposés, car ils travaillaient à l'extérieur et ne pénétraient que rarement dans la cuisine. La figure 6 montre l'emplacement de la source et les principaux endroits où les victimes furent irradiées, suivant les constatations faites sur place. C'est un communiqué des autorités de santé, alertées à la suite de la perte de la source, qui a permis à un médecin de campagne d'évoquer l'*étiologie* des symptômes.

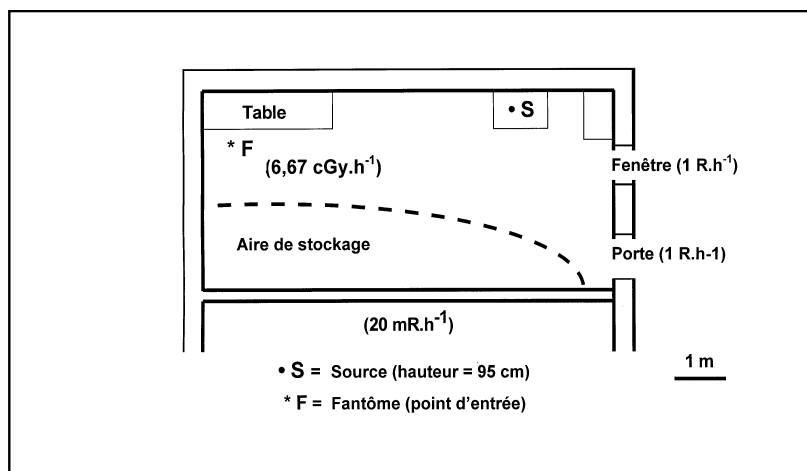


Figure 6 :
Accident de Sétif, Algérie (1978)

Plan schématisé de la cuisine, montrant les débits de dose (röntgen h⁻¹ et cGy h⁻¹, déterminés par une reconstitution théorique. Les débits de dose sont indiqués aux endroits où les victimes furent irradiées alors qu'elles séjournèrent dans la pièce. D'après [Jammet, 1980b]

Au total, l'accident a causé la mort de la grand-mère (quarante-sept ans), des aplasies prolongées graves chez trois jeunes filles de quatorze, dix-sept et dix-neuf ans et chez une jeune femme (enceinte) de vingt ans, ainsi que des brûlures radiologiques multiples chez les deux jeunes garçons ; ces sept victimes ont toutes été traitées à l'Institut Curie. La reconstitution précise des doses individuelles et de leurs distributions spatiales fut difficile et imprécise, en raison de la durée de l'exposition, des déplacements et mouvements des victimes. La figure 7 montre, pour l'une des sœurs, les isodoses calculées pour ses deux positions les plus fréquentes, debout et accroupie. L'aplasie profonde des quatre jeunes femmes dura sept semaines ; elle fut traitée par les moyens classiques (isolation en chambre stérile, traitements anti-infectieux, maintien des équilibres hydrique, électrolytique et nutritionnel). La plus âgée avorta spontanément deux semaines après la mort du fœtus. La phase de récupération hématologique dura près de cinq semaines.

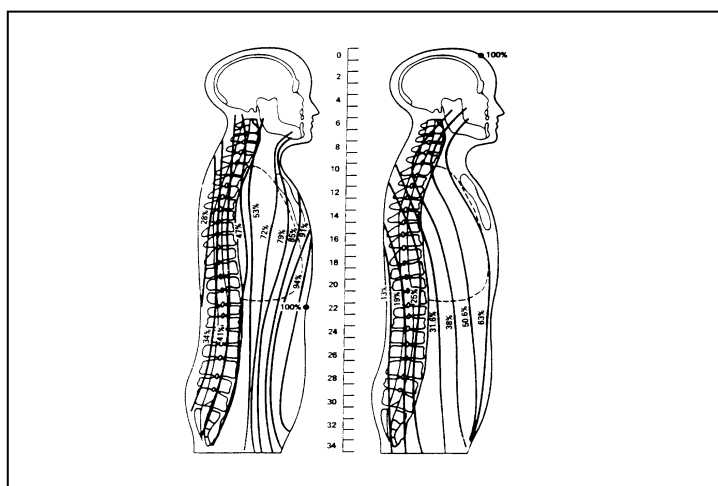


Figure 7 :
Accident de Sétif, Algérie (1978)

Isodoses obtenues dans un fantôme, lors de la reconstitution dosimétrique (face à la source) effectuée sur place. A gauche, sujet debout, à droite sujet accroupi.

Distance à la source : 1,25 m.
D'après [Jammet, 1980b]

A Casablanca, Maroc (19 mars 1984) les mêmes causes qu'en Algérie causèrent les mêmes effets : une source d'iridium 192 de 600 GBq (16,3 Ci), disparue d'un chantier, n'a été retrouvée que quatre-vingt jours plus tard dans une maison occupée par une famille regroupant trois générations [Parmentier, 1990 ; Mettler, 2001b]. La durée de l'irradiation correspond en gros à la *période physique* de l'iridium 192 ($T_{1/2} = 74$ jours). L'accident a été découvert fortuitement, après le décès de quatre jeunes enfants d'une même fratrie, dans le même tableau d'aplasie que celui qui avait causé la mort des deux parents quelques jours auparavant. La reconstitution dosimétrique présenta le même type de difficultés que celle de l'accident d'Algérie, pour les mêmes raisons. Cependant, les incertitudes furent moindres, car l'irradiation se produisait, pour les parents et les enfants la nuit pendant leur sommeil, pour les grands-parents et les proches durant les visites qu'ils rendaient au père quand il était alité ; l'estimation des distances séparant la source des victimes et celle des durées d'exposition en ont été facilitées. La figure 8 montre un plan de la chambre où dormaient deux générations, les parents et leurs quatre enfants. Les doses reçues par les quatre enfants, exposés dans leurs lits par la source posée sur une table de nuit, ont été évaluées entre 4 et 8 Gy, selon la distance qui les séparait de la source. Peu après que l'accident a été reconnu, les trois personnes de la famille encore vivantes qui semblaient le plus gravement atteintes furent transférées à l'Institut Curie : les deux grands-parents et un oncle âgé de trente-deux ans. Seule la grand-mère présenta les signes graves d'un syndrome aigu d'irradiation (90 % de sa moelle avaient reçu plus de 3 Gy, avec une dose moyenne d'environ 7 Gy), les deux hommes se maintenant en hypoplasie. Les trois guérirent après quelques complications, notamment infectieuses. Au total huit décès ont été recensés (deux membres de la

famille venus assister aux obsèques des enfants et qui avaient séjourné plusieurs jours dans la pièce où la source était entreposée, sont morts dans les semaines qui ont suivi). Il n'est pas exclu qu'il ait fait d'autres victimes, car plusieurs personnes, demeurées inconnues, ont fait des visites prolongées dans la maison avant la découverte de la source.

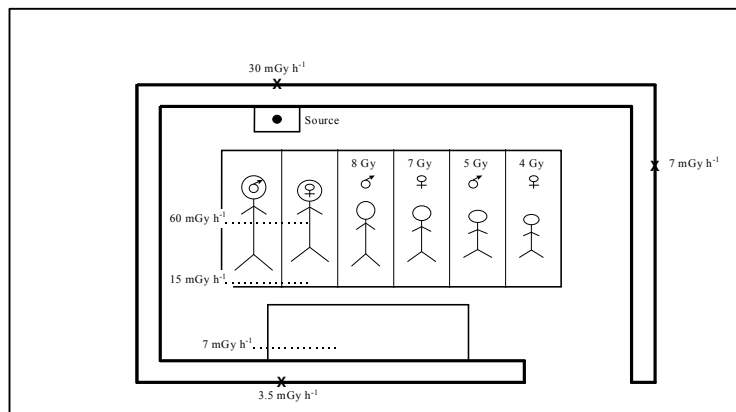


Figure 8 :
Accident de Casablanca, Maroc (1984)

Plan de la chambre des parents et de leurs enfants, indiquant l'emplacement de la source par rapport aux victimes. Les débits de dose furent calculés pour une activité de 500 GBq et des ajustements faits pour tenir compte de la décroissance de l'iridium 192.

D'après [Mettler, 2001a]

A **San Salvador**, El Salvador (5 février 1989), trois employés d'une installation industrielle de stérilisation ont été irradiés par la source de cobalt 60 de 66 TBq (18 000 Ci), alors qu'ils tentaient de débloquer le porte-source [IAEA, 1990]. L'irradiation n'a été reconnue que trois jours plus tard, avec l'apparition de brûlures. Il a fallu encore attendre deux semaines avant que l'irradiateur ne soit enfin mis en situation sûre. Entre temps quelques manipulations avaient été pratiquées, n'occasionnant toutefois que des expositions peu élevées. Les doses reçues par les trois employés furent évaluées à 8,4 et 3 Gy, avec une répartition hétérogène ; chez le plus gravement atteint la dose en certains points dépassait 10 Gy. Les trois victimes furent évacuées au Mexique après quelques semaines ; elles furent traitées avec un facteur de croissance (GM-CSF) dont l'efficacité n'a pas pu être prouvée. Après leur retour dans leur pays d'origine au bout de six mois, des complications tardives ont eu des conséquences très graves pour deux des irradiés qui ont chacun subi l'amputation d'une jambe ; six mois plus tard, l'un a dû être amputé de l'autre jambe et l'autre est mort des suites d'une intervention thoracique.

A **Forbach**, France (13 août 1991), les trois manutentionnaires d'un accélérateur linéaire d'électrons utilisé pour dépolymériser du téflon ont été irradiés du fait de leurs entrées répétées dans l'appareil alors que la tension accélératrice était maintenue, afin de gagner du temps [Chanteur, 1992]. Le débit de dose de l'émission résiduelle était de quelques Gy par seconde (débit de dose en fonctionnement : 80 000 Gy s⁻¹). Les premières lésions cutanées ont été attribuées à un coup de soleil ; après plusieurs jours et devant l'évolution sévère des lésions, leur

origine radiologique fut reconnue. En raison de l'état grave de deux victimes, leur transfert au service des grands brûlés de l'hôpital Percy fut effectué deux semaines après l'accident. La victime la plus gravement atteinte dut subir des greffes de peau répétées, qui nécessitèrent son hospitalisation pendant une année entière. Son état est demeuré précaire.

A **Hanoï**, Vietnam (17 novembre 1992), un ingénieur a été irradié gravement aux mains par le faisceau d'un accélérateur linéaire d'un institut de physique, alors qu'il procédait au positionnement d'un échantillon à analyser [*IAEA, 1996b*]. L'opérateur a remis la machine en route depuis le tableau de contrôle situé dans une autre pièce, alors que l'expérimentateur avait encore les deux mains dans la cuve d'irradiation. Bien que la victime ait eu la notion immédiate de son accident, l'origine de ses brûlures ne fut reconnue formellement qu'au bout de deux semaines en raison d'un état clinique alarmant. Quatre mois plus tard, le patient fut transféré en France (Institut Curie) dans un état grave ; la reconstitution dosimétrique ne fut pas suffisamment précise pour guider efficacement le chirurgien, en raison des incertitudes sur les positions des mains et sur la durée de l'exposition. Les mesures par résonance paramagnétique électronique (RPE), pratiquées sur des échantillons osseux prélevés sur la main droite lors des premières amputations (mai et juin 1993), fournirent des résultats cohérents avec l'évolution clinique : 45 ± 11 Gy au médus et 21 ± 5 Gy au troisième métacarpe. Les mêmes mesures pratiquées sur le poignet de la chemise ont donné 30 ± 10 Gy côté palmaire et 20 ± 6 Gy côté dorsal. La victime a dû subir l'amputation de sa main droite sept mois après son accident et des deux derniers doigts de sa main gauche six mois plus tard. Le patient, appareillé, n'a pu retourner au Vietnam qu'après avoir subi plus de dix-huit mois de soins.

A une vingtaine de kilomètres au nord du **Caire**, Egypte (5 mai 2000), dans le village de Meet Halph, une source d'iridium 192 de 1 TBq (30 Ci) au moment de l'accident, perdue dans le sable par une entreprise de soudure, a été trouvée par un agriculteur de soixante et un ans [*El Naggar, 1997*]. La perte de la source ne semble pas avoir été notifiée aux autorités égyptiennes. L'aplasie, la fièvre et les éruptions cutanées furent d'abord attribuées à une virose. Ce n'est qu'après la mort de l'agriculteur et d'un de ses fils âgé de neuf ans (trente et quarante-deux jours après la perte de la source) et qu'après l'hospitalisation au Caire des autres membres de la famille, que la relation de cause à effet fut évoquée. Les membres survivants étaient au nombre de sept : la mère de famille, trois enfants et une tante, qui avaient reçu entre 3 et 4 Gy. Ils avaient été exposés pendant sept semaines. Outre cette famille, cent cinquante habitants du village ont été exposés pendant la même période à des

doses entre 25 et 150 mGy. Les intervenants, au nombre d'une centaine, ont reçu des doses entre 15 et 100 mGy.

A **Fleurus**, Belgique (11 mars 2006), un réparateur a pénétré dans une cellule d'irradiation d'une installation industrielle utilisée pour la stérilisation de matériels médicaux et de produits alimentaires, alors qu'il pensait que la source de cobalt 60 était en position sûre. Des alarmes s'étaient déclenchées alors que la cellule n'était pas en phase d'irradiation et que la porte d'accès était en position ouverte. Le personnel présent n'arrivant pas à acquiescer ces alarmes, il a été fait appel à un spécialiste qui a rapidement mis fin à ce déclenchement intempestif. Le technicien est allé refermer la porte de la cellule ; la procédure prévoyait que, préalablement à la fermeture de la porte, une vérification de l'absence de personnel dans la cellule d'irradiation soit effectuée ; dans ce but, le technicien a pénétré jusque dans le fond de la cellule, puis, après avoir vérifié l'absence de personnel, a actionné le bouton validant ce contrôle. C'est lors de cette opération, qui a duré une vingtaine de secondes, que l'employé a été exposé à la source de cobalt 60 de 30 PBq (810 000 Ci) qui n'était pas complètement descendue dans sa piscine de stockage. Les premiers symptômes de la surexposition sont rapidement apparus mais ont été attribués par le médecin consulté à des excès de boisson datant de la veille au soir. Le diagnostic étiologique n'a été évoqué que près de trois semaines plus tard par le médecin du travail, à la vue d'une alopecie naissante. Au vu des premiers bilans hématologiques, la victime a été transférée en France à l'hôpital Percy le 31 mars. La surexposition, estimée supérieure à 4 Gy par les spécialistes de l'IRSN, a entraîné une aplasie profonde. L'exposition ayant été fortement hétérogène (les plus fortes doses ayant été reçues au niveau du dos), la repopulation des zones médullaires désertifiées par des cellules en provenance de zones relativement épargnées a été jugée comme étant un scénario vraisemblable. Un traitement adjuvant par des facteurs de croissance hématopoïétiques s'est montré efficace [*Gourmelon, 2006 ; IRSN, 2006a*].

A **Dakar**, Sénégal, puis à **Abidjan**, Côte d'Ivoire (été 2006), des irradiations accidentelles avec une source d'iridium 192 utilisée pour la gammagraphie ont eu lieu pendant une période de plusieurs semaines. En raison d'un défaut de l'appareil survenu à Dakar, la source d'iridium 192 était restée coincée dans la gaine d'éjection qui permet sa sortie du boîtier blindé de protection. Dans un premier temps la gaine a été stockée pendant plusieurs semaines sous un escalier, puis elle a été transportée dans le même état dégradé à Abidjan où l'anomalie a enfin été détectée. Deux vigiles et deux opérateurs ont reçu de fortes doses et, en raison de la gravité de leur état, ont été transférés en France à l'hôpital Percy ; tous présentaient des lésions localisées et un des quatre

présentait en plus une atteinte hématologique [IRSN, 2006b]. En outre, comme plusieurs jours s'étaient écoulés entre le blocage et sa découverte, le nombre de personnes ayant séjourné à proximité de la source et, de ce fait, susceptibles d'avoir été exposées, peut avoir été relativement important ; cependant leurs niveaux de dose ne devraient pas être suffisamment élevés pour se traduire par des effets aigus.

4/1/2

Secteur médical

Dans un hôpital de **Saragosse**, Espagne (10 au 20 décembre 1990), vingt-sept malades ont reçu des doses plus élevées que celles prévues, à la suite d'une panne de l'accélérateur linéaire [Esco, 1993]. Afin de corriger une déviation du faisceau d'électrons, un réparateur avait modifié l'énergie des électrons. Le tableau de contrôle indiquait alors invariablement la même énergie, fautive, quelle que soit la position de la commande manuelle. Pendant dix jours, les doses délivrées aux patients ont été trois à sept fois supérieures aux doses prescrites, selon les énergies programmées. Les patients, particulièrement ceux qui étaient traités pour des tumeurs cervicales ou thoraciques, ont développé des lésions des poumons, de l'oropharynx et de la moelle, compliquées par des atteintes vasculaires et cutanées. Comme les victimes étaient toutes soignées pour des tumeurs rapidement évolutives, il est difficile d'établir avec exactitude la part de responsabilité de l'accident dans le nombre de décès. On estime cependant que cet accident est responsable d'au moins treize décès.

Dans un service de radiothérapie d'**Epinal**, France, des malades ont été surexposés entre 2001 et novembre 2006.

Le rapport d'expertise demandé à l'IRSN par le Ministre de la Santé est disponible sur le site web de l'Institut (www.irsn.org). Les informations relatives à ce dossier y seront mises à jour au fur et à mesure de son instruction.

A **Lyon**, France, (novembre 2004) une manipulation erronée lors du traitement par radiothérapie d'une pathologie grave non cancéreuse a occasionné l'exposition d'une partie de l'organisme du patient plus grande que celle qui était prescrite. L'erreur est due à une confusion sur l'unité de mesure utilisée pour définir la surface à irradier, cette unité n'ayant pas été précisée (millimètre au lieu de centimètre) lors du changement d'opérateur. Des signes anormaux survenus en mai 2005, plusieurs mois après la surexposition, d'abord attribués à une hypersensibilité aux rayonnements, ont conduit au décès de la victime en mars 2006 [ASN, 2006a].

4/1/3

Secteur militaire

Un accident grave a eu lieu à **Tammiku**, Estonie (21 octobre 1994), après qu'une source de césium 137 d'origine militaire eut été dérobée dans un centre de stockage proche de la capitale Tallin et est restée dans une maison pendant vingt-sept jours [IAEA, 1998a]. Le décès rapide du protagoniste principal, âgé de vingt-cinq ans, a été attribué à une toxémie d'origine traumatique. Il a fallu qu'un jeune garçon de quatorze ans présente des brûlures et une aplasie pour que l'étiologie soit évoquée par un pédiatre averti. Les doses ont été estimées à 30 Gy aux doigts et à 3 Gy à l'organisme entier (par calcul et analyse cytogénétique). L'alerte a été donnée dans la nuit et a été suivie par l'évacuation des occupants de quinze maisons situées dans un périmètre de 200 mètres autour de la maison où la source était entreposée (débit de dose supérieur à 0,4 $\mu\text{Gy h}^{-1}$ à une distance de 100 mètres) ; ces habitants n'ont été autorisés à regagner leur maison que le lendemain. La source, dont l'activité n'a pas été précisée, a été récupérée dans des conditions précaires puis déposée, dans une enveloppe blindée de protection, au centre du site de stockage disponible, destiné à des sources beaucoup moins puissantes. En tout sept personnes ont été exposées à des doses supérieures à 100 mGy, et cinq ont subi des dommages graves. Les sept intervenants qui ont participé à la récupération de la source ont reçu des doses inférieures ou égales à 0,13 Gy. Les habitants des maisons voisines ont reçu, pour les plus exposés, entre quelques dizaines et quelques centaines de mGy.

Près du village de **Lia**, Géorgie (2 décembre 2001), à 370 km à l'ouest de Tbilissi, trois bûcherons ont trouvé dans la forêt deux cylindres autour desquels la neige avait fondu. Au cours de la nuit, ils ont utilisé ces objets comme source de chaleur. Au bout de quelques heures, ils ont présenté les signes prodromiques classiques d'un syndrome aigu d'irradiation [IPSN, 2002]. Des brûlures étendues sont apparues au bout d'une à deux semaines. La cause radiologique n'a été reconnue que trois semaines plus tard. Les cylindres se sont avérés être des générateurs thermoélectriques fonctionnant avec une source de strontium 90 de 1,3 PBq (35 000 Ci) délivrant un débit de dose (rayons X) de 1 Gy h^{-1} à 1 mètre. Ces générateurs ont vraisemblablement été utilisés pour alimenter des balises radio ayant servi à l'approche de terrains d'aviation militaire de l'armée rouge. Deux victimes, qui ont reçu des doses comprises entre 2 et 3 Gy, ont souffert d'une aplasie profonde qui a régressé en un mois. Les trois patients ont présenté des brûlures évolutives graves au niveau du dos ; l'un d'entre eux avait en plus des brûlures aux mains et aux jambes. Au début de l'année 2002, les moyens médicaux disponibles localement se sont avérés insuffisants pour traiter convenablement deux patients. En février 2002, le blessé le plus grave a été transféré en France

à l'hôpital Percy où il a subi une greffe de peau artificielle, suivie de deux autogreffes. Un autre blessé, moins gravement atteint, a été transféré à Moscou.

Les deux principales leçons à tirer de ces accidents sont les suivantes :

- **Trop de petites sources sont égarées. Ces sources « orphelines » causent souvent des blessures graves et les victimes arrivent tardivement en milieu médical. Des améliorations portant sur la sûreté et la gestion de ces sources sont indispensables. L'absence ou l'insuffisance de réglementation constitue un facteur aggravant.**
- **Dans les installations fixes, les accidents surviennent par défaut d'application de règles élémentaires de sûreté, par manque de formation du personnel et par défaut d'application des règlements et consignes ; il est fréquent que certaines sources, particulièrement des sources industrielles itinérantes, soient démunies de tout document accompagnateur.**

4/1/4

Actes de malveillance

Quelques rares actes criminels utilisant des sources de rayonnements ont été rapportés au cours des dernières décennies. Deux tentatives d'assassinat dans les années 70 ont amené leurs auteurs devant la justice de leur pays. La première tentative a eu lieu aux Etats-Unis en 1974 : un homme a volontairement exposé, à cinq reprises au cours de six mois, son fils de treize ans à une source de césium 137 de 37 GBq (1 Ci) qu'il détenait dans le cadre de ses activités de recherches de gisements de pétrole [Bailey, 1977 ; Collins, 1980]. L'enquête a prouvé que le geste criminel traduisait un désir de vengeance envers la famille reconstituée de la mère, divorcée. L'origine des lésions radioinduites ne fut reconnue que deux ans plus tard, après que la victime eut subi plusieurs traitements de chirurgie réparatrice. La séquelle la plus importante a été une castration fonctionnelle. La deuxième tentative a eu lieu en France dans les années 80 : un employé d'une installation nucléaire a attenté à la vie d'un collègue en plaçant sous son siège de voiture une barre radioactive qu'il avait subtilisée dans un atelier. La révélation de l'attentat a été fortuite quand le passage de la voiture lors de la sortie de l'installation a déclenché les alarmes. L'exposition a été trop courte pour que la dose reçue cause des dommages sérieux.

D'autres actions malveillantes ont été rapportées : aux Etats-Unis, une plainte a été déposée en 1995 par une scientifique, enceinte au moment des événements, pour empoisonnement volontaire par du phosphore 32.

Une publication russe fait état d'au moins quatre cas d'actes criminels utilisant des sources de rayonnements gamma, dont trois pour lesquels la source avait été placée sous le siège de la victime [Krasniouk, 2004]. Ces quelques cas constituent en fait des actes criminels isolés, motivés par le désir de vengeance, et ne répondent pas à la définition d'actes de malveillance.

Enfin, l'assassinat à Londres (novembre 2006), pour des raisons apparemment politiques, d'un ressortissant russe à l'aide de polonium 210 a récemment mobilisé les médias [IRSN, 2006c]. A la suite de l'introduction de ce radionucléide émetteur α , d'activité spécifique élevée, dans une boisson, la victime est rapidement tombée malade puis est décédée à la suite de la défaillance de plusieurs organes et tissus (rein, cœur, moelle osseuse).

4/2

Nombre important de victimes

La probabilité pour que de nombreuses personnes soient exposées augmente avec la durée pendant laquelle la perte du contrôle de la source ou sa disparition restent ignorées. Ces circonstances se trouvent réunies lorsque des erreurs se produisent au cours d'irradiations médicales ; elles peuvent alors causer de très nombreuses irradiations accidentelles. Elles existent aussi lorsque des sources, le plus souvent industrielles ou militaires, sont égarées. Six accidents survenus dans des hôpitaux et deux cas de sources égarées (une source industrielle et une source militaire) constituent des exemples de la fréquence des accidents selon la nature de la source et de l'aggravation de l'état des victimes causée par le délai entre l'accident et sa connaissance.

4/2/1

Secteur médical

Le premier accident grave et connu en milieu médical a eu lieu à l'hôpital de **Colombus** (Ohio, USA) : une erreur sur la valeur de la période physique du cobalt 60 a causé entre 1974 et 1976 la surexposition de 426 malades pour lesquels les doses reçues ont été de 15 % à 45 % supérieures aux doses prescrites, selon le moment du traitement [Cohen, 1995]. Parmi les 183 malades qui étaient encore vivants un an après leur traitement, plus du tiers présentaient des complications graves du système nerveux central (encéphale et moelle) et du système digestif (oropharynx, côlon, rectum). Il semble qu'il n'y ait pas eu de décès directement imputables aux surexpositions dans les semaines qui ont suivi les traitements.

Un effet inverse a été observé entre l'automne 1982 et l'hiver 1991 à l'hôpital de **Stokes-Upon-Trent** (Royaume Uni) à la suite d'une erreur de calcul dans les nouvelles procédures de traitement : 1 045 malades ont reçu des doses inférieures de 5 % à 35 % à celles qui leur avaient été prescrites [Ash, 1994]. Les conséquences de cette sous-exposition ne pourront jamais être précisées, d'autant plus que la comparaison des guérisons ou rémissions prolongées entre des malades traités correctement et ceux impliqués dans cette erreur thérapeutique est très difficile à interpréter.

Le troisième accident est survenu aux **Etats-Unis** dans quatre hôpitaux différents ; une erreur de programmation répétitive sur le même type d'appareil (THERAC 25) a causé à cinq reprises, entre juin 1985 et janvier 1987, le surdosage de malades [Newman, 1990]. L'événement initial est une erreur de programmation de l'accélérateur linéaire par l'opérateur, alors que la table de contrôle signalait la méprise. Il a donc fallu que celui-ci insiste en court-circuitant le logiciel informatique. La dernière erreur s'est produite en dépit d'un avertissement et d'une procédure de sécurité émanant des autorités de santé, diffusés à tous les hôpitaux concernés. Les conséquences ont été des brûlures graves, des *myélites*, des paralysies, complications dont certaines ont entraîné la mort des malades.

Le quatrième accident a eu lieu dans un hôpital d'**Indiana**, Pennsylvanie, USA (16 novembre 1992). Au cours d'un traitement anticancéreux par *curiethérapie* à fort débit, une malade de quatre-vingt-deux ans a regagné son établissement de postcure sans avoir été débarrassée d'une des sources d'iridium 192 de 156 GBq (4,22 Ci) [US NRC, 1993] qu'elle avait reçue. Quatre jours plus tard, une infirmière a jeté dans les déchets médicaux le cathéter qui contenait la source. Le lendemain la malade est morte, sans que son décès soit attribué à l'irradiation. Les doses, calculées sur la base d'une source en position d'irradiation pendant quatre-vingt-treize heures, ont été estimées à 20 Gy à la moelle osseuse lombaire et à 8 Gy au rectum. L'alerte n'a été donnée que plusieurs jours plus tard, quand l'appareil de contrôle d'une station de traitement des déchets médicaux, située dans un autre Etat, a signalé la présence anormale de radioactivité. Au total une centaine de personnes ont été exposées, parmi lesquelles le personnel et les visiteurs de l'établissement de soins, le chauffeur transportant les déchets et le personnel de la station de traitement des déchets ; les doses les plus élevées ont été reçues par les infirmières au niveau de leurs mains.

Le cinquième accident a eu lieu au **Panama** (quatrième trimestre 2000) ; une erreur dans la détermination des doses délivrées aux patients par une source médicale de cobalt 60 a causé vingt-huit victimes, dont certaines gravement atteintes [IAEA, 2001b]. L'origine de la surexposition

est une modification dans la façon d'introduire les données de base dans le logiciel de dosimétrie ; cette modification, non autorisée par le système informatique, avait pour but la mise en place d'écrans supplémentaires, afin de réduire le champ d'irradiation. Les doses délivrées aux patients ont été beaucoup plus élevées que les doses prescrites ; dans certains cas, elles ont atteint jusqu'à 120 Gy à l'intestin. Alors qu'en novembre et décembre 2000 des signes anormaux auraient pu être interprétés comme des signes de surexposition, ce n'est qu'en mars 2001 que l'erreur a été suspectée et que les traitements ont été interrompus. En dépit de la longue période au cours de laquelle l'erreur s'est répétée, le nombre de victimes est relativement petit, en raison des affections traitées (cancers du côlon, cancers génitaux de la femme et cancers de la prostate). Sur les huit décès survenus au cours du premier semestre 2001, trois sont manifestement consécutifs à l'accident, deux lui sont peut-être attribuables et un n'a pas de rapport avec cet accident ; quant aux deux derniers, les données sont insuffisantes pour pouvoir en tirer la moindre conclusion. Les survivants présentent des séquelles graves des sphères digestive et urinaire. Ils ne sont pas à l'abri de complications tardives graves, comme des occlusions intestinales, des nécroses du rectum et du côlon.

Le sixième accident est arrivé à **Bialystok**, Pologne (27 février 2001), à la suite du dysfonctionnement d'un accélérateur linéaire Neptun 10P délivrant des électrons de 8 MeV utilisés pour la radiothérapie du cancer du sein [Wojcik, 2004 ; IAEA, 2004]. Cinq patientes ont été surexposées lors de l'administration de leur 22^e fraction (normalement 2 Gy à chaque fraction). A la suite d'une intervention chirurgicale pratiquée chez la plus sévèrement atteinte des patientes, des examens par résonance paramagnétique électronique (RPE) sur des prélèvements de côtes ont montré des doses ajoutées de 56 ± 10 Gy (si la surexposition est due aux seuls électrons) ou 42 ± 8 Gy (si la surexposition est aussi due à des photons, ce qui ne peut pas être totalement exclu). La gravité de l'évolution des lésions radioinduites chez deux patientes a justifié leur transfert au printemps 2002 dans un centre spécialisé en France (Institut Curie), où elles ont été traitées chirurgicalement avec greffes (lambeau musculo-cutané). Elles ont pu regagner leur pays au bout de deux mois. Les trois autres ont dû subir des interventions chirurgicales de reconstruction, pratiquées au centre de la Croix Rouge de Kielce. A la fin de l'année 2002, toutes cinq présentaient un état satisfaisant ; le niveau des doses reçues au niveau de leur thorax justifie une surveillance prolongée, à la recherche d'une fibrose pulmonaire et d'une cardiomyopathie radioinduites.

4/2/2

Secteur industriel

Un exemple de perte de source industrielle est fourni par l'accident de **Xinzhou**, province de Shenzi, Chine (19 novembre 1992). Après vingt ans de fonctionnement, les sources de cobalt 60 d'un irradiateur industriel avaient été stockées dans un puits lors de la fermeture de l'installation en 1980 [*Wu de-Chang, 1993*]. A l'occasion de l'ouverture d'un chantier de construction, un ouvrier a trouvé un objet métallique et l'a ramené chez lui. Cet ouvrier, son frère et son père sont morts quinze jours plus tard à l'hôpital sans que l'origine des troubles n'ait été identifiée ; ces décès furent attribués à une maladie infectieuse. Comme le malade était venu à l'hôpital avec la source, une centaine de personnes ont été irradiées : le personnel, les visiteurs puis les manutentionnaires qui avaient transporté la source non identifiée jusqu'au lieu de stockage des déchets de l'hôpital. Ce n'est qu'après un mois que la cause réelle a été évoquée. La source a été retrouvée plus de deux mois après son détournement.

4/2/3

Secteur militaire

A **Lilo**, Géorgie (1996-1997), onze gardes-frontières du centre d'entraînement ont été exposés à des sources militaires de césium 137, dont douze ont pu être identifiées. De plus, deux cents systèmes de visée nocturne au radium 226 pour armes individuelles avaient été abandonnés et ont été retrouvés éparpillés sur le centre. Ces sources qui servaient à l'entraînement de soldats pour leur préparation à une guerre nucléaire avaient été abandonnées par l'armée soviétique. L'irradiation a duré approximativement un an, de mi-1996 à avril 1997 et a été formellement reconnue en août 1997 [*IAEA, 2000b ; Peter, 2001*]. Les quatre victimes les plus gravement atteintes, souffrant de brûlures multiples, ont été traitées en France (deux à l'hôpital Percy et deux à l'Institut Curie) ; sept autres victimes ont été hospitalisées en Allemagne. La figure 9 montre les lésions multiples présentées par les victimes qui, pendant leurs gardes et leur sommeil, utilisaient une capote militaire dont une poche contenait une source de césium, en guise de couverture pour se protéger du froid de la nuit. Pour la première fois dans le cas de brûlures radiologiques, des greffes de peau artificielle ont été utilisées pour traiter avec succès certaines lésions profondes. Le nombre de sources retrouvées sur le terrain permet de supposer que d'autres recrues ont pu être exposées.



Figure 9 :
Accident de Lilo, Georgie (1996-1997)

Lésions caractéristiques causées par une source de césium 137, placée dans la poche d'une capote militaire. Exposition prolongée, particulièrement pendant la nuit, quand les gardes-frontières utilisaient la capote comme couverture pour se protéger du froid (photos : P. Gourmelon)

Ces accidents, individuellement différents par leurs origines, leurs natures et leurs conséquences, permettent de dégager les leçons suivantes :

- Ces accidents possèdent un point commun : des mesures de prévention fondées sur le bon sens auraient évité la plupart des morts et des blessés graves.
- La plupart des accidents rapportés en milieu hospitalier concernent des surdosages. Il ne faudrait pas oublier que des sous-dosages, qui ne se traduisent pas par des effets immédiats, peuvent aussi être lourds de conséquences pour les malades. Il convient cependant de reconnaître que les accidents à l'hôpital sont rares, comparés au nombre d'appareils puissants, au nombre de malades traités et aux traitements effectués (le nombre de traitements par radiothérapie pratiqués dans le monde entre 1991 et 1996 dépasse un million par an (dont 90 % pour la téléthérapie)).
- La rubrique –accidents méconnus entraînant un nombre relativement élevé de victimes– est particulièrement intéressante par la comparaison entre les deux secteurs industriel (auquel il n'est pas irréaliste d'adjoindre le secteur militaire puisqu'il ne s'agit pas d'armes) et médical. Ils se distinguent par le nombre de victimes et le nombre de décès directement imputables à l'accident. Pour les accidents en milieu médical, les erreurs commises lors d'actes de radiothérapie externe touchent un grand nombre de patients, puisque l'erreur n'est constatée qu'à l'apparition de complications, après un certain nombre de fractions administrées (qu'il s'agisse de sources de cobalt ou d'accélérateurs) ; en revanche, en raison du fractionnement et de l'arrêt du traitement dès l'apparition des premiers signes anormaux, peu de décès sont imputables directement à l'accident. Ainsi, les exemples décrits ci-dessus concernent des dizaines voire des

centaines de malades (à l'exception de la curiethérapie pour laquelle, en général, l'erreur ne concerne qu'un seul patient), dont la plupart développent des complications graves et évolutives, mais n'entraînent qu'un nombre limité de décès. A l'inverse, les accidents en milieu industriel sont responsables d'une proportion élevée de décès, comparée au nombre d'individus impliqués, en raison des doses élevées reçues avant la découverte de l'accident.

- De plus en plus d'accidents sont causés par des sources militaires abandonnées lors du repli des armées. L'absence de consignes lors de la passation des pouvoirs et le désintérêt des responsables militaires sont la cause directe de ces accidents.

4/3

Conséquences graves pour la population et l'environnement

Trois accidents très lourds de conséquences pour les victimes ont eu en plus des répercussions graves sur l'environnement, nécessitant de gros travaux d'assainissement ; ils ont causé d'importants dommages socio-économiques. Ils ont eu la même cause : l'abandon d'une source de radiothérapie suivie de la dissémination de ses constituants radioactifs. Un autre accident, survenu dans un hôpital, a blessé plus de cent malades et a constitué un véritable drame national.

A **Juarez**, Mexique (6 décembre 1983), le démantèlement sauvage d'une source de radiothérapie, constituée de micro-billes de cobalt 60 de 2,6 GBq (70 mCi) chacune, pour une activité totale de 15,6 TBq (420 Ci) a été découvert par hasard plus de cinq semaines plus tard [*Sec. De Energ., 1984*]. L'appareil de radiothérapie avait été acheté en 1977, n'avait jamais été utilisé et avait été abandonné dans des sites divers pour finalement être complètement oublié par ses détenteurs légaux. Il a été récupéré par des ferrailleurs qui l'ont transporté sur le plateau d'une camionnette, délaissée pendant quelque temps dans un terrain vague à cause d'une panne de moteur. Le début du démontage destiné à isoler les métaux facilement négociables a eu lieu dans le véhicule, y dispersant au passage 2 TBq de produits radioactifs. Les divers métaux récupérés ont alors été revendus à des fonderies qui, selon la nature des métaux, les ont utilisés pour la fabrication de fers à béton et de pieds de table. Les quantités contaminées par cet ajout ont été évaluées à 500 tonnes pour les ferrailles revendues aux USA et à 2 360 tonnes pour celles livrées au Mexique, alors que les pieds de table métalliques étaient exportés aux USA et au Canada. L'évènement a été détecté lorsqu'un camion chargé

de fers à béton en provenance d'une fonderie mexicaine a déclenché le 16 janvier 1984 des alarmes à l'entrée du centre militaire américain de Los Alamos. L'origine a été assez rapidement identifiée et des travaux de détection immédiatement entrepris dans l'environnement et sur la population. Environ quatre mille personnes ont été exposées, la plupart à des doses faibles. Environ huit cents ont reçu des doses supérieures à 50 mGy et huit des doses comprises entre 1 et 7 Gy. Aucun décès n'a été déploré, en raison de l'étalement de l'exposition dans le temps. A cause des multiples déplacements du véhicule dans une ville étendue, l'assainissement a été long ; il a permis de retrouver cent billes de cobalt 60 ; ce n'est que le 3 mars 1984, soit trois mois après le démantèlement de la source, que les vingt-sept dernières billes ont pu être localisées. L'assainissement a été décrété terminé quatre mois après le début de l'accident (2 avril 1984), après avoir nécessité le contrôle de 17 000 maisons, dont 814 ont dû être démolies, en raison des difficultés, voire des impossibilités, rencontrées pour les décontaminer.

A **Goiânia**, Brésil (10-13 septembre 1987), la dispersion d'une source médicale de chlorure de césium 137 de 50,9 TBq (1 375 Ci), abandonnée en 1985 dans une clinique désaffectée, a eu des conséquences plus graves qu'à Juarez, à cause de la très grande solubilité du produit [*IAEA, 1988 ; IAEA, 1998b*]. Le barillet de l'appareil d'irradiation, contenant la source radioactive, a été récupéré par deux pères de famille qui l'ont rapporté chez eux. Les premiers signes d'irradiation globale et localisée, vomissements et diarrhées, sont apparus dès le lendemain chez ces deux individus, suivis rapidement d'érythème des mains ; d'autres membres des deux familles ont aussi souffert de troubles identiques. Ces ennuis de santé n'ont pas empêché les « bricoleurs » de cisailer le barillet, ce qui a entraîné la libération de la poudre de césium. Les troubles présentés par les deux chefs de famille ne faisant qu'empirer, ces derniers ont consulté un médecin qui a diagnostiqué une pathologie tropicale. Cinq jours après la « récupération » de la source (18 septembre), les premiers fragments ont été vendus à des ferrailleurs. La dispersion de la source de césium 137 dans l'environnement immédiat des habitations a entraîné des troubles digestifs chez les membres de nombreuses familles. Les enfants ont été particulièrement atteints, car, après avoir constaté la luminescence du produit, ils l'ont utilisé pour leurs jeux et pour baliser les allées. Le 23 septembre, une personne a été hospitalisée pour brûlures. L'origine radiologique de l'accident a alors été évoquée, mais réfutée par le médecin, qui a maintenu son diagnostic d'origine. Ce n'est que quinze jours après l'arrivée de la source au foyer familial (28 septembre) que des mesures de débit de dose ont été pratiquées, par un prospecteur de pétrole qui possédait le matériel nécessaire. Le technicien a d'abord cru à une défaillance de son matériel quand l'aiguille de son appareil s'est immédiatement bloquée en butée, dès qu'il a été à proximité des

personnes ou des maisons ; un deuxième appareil a confirmé la fiabilité de la première mesure. L'alerte a finalement été donnée dans la nuit du 29 au 30 septembre, deux semaines après la « récupération » de la source. Le stade de football de la ville (un million d'habitants) a été réquisitionné afin de procéder au tri des personnes. Six individus ont été immédiatement évacués sur Rio de Janeiro, suivis par quatre autres le 3 octobre. A la mi-octobre, vingt personnes étaient hospitalisées, dont quatorze à Rio de Janeiro et six à Goiânia. Parmi ces vingt personnes, dix avaient reçu des doses comprises entre 3 et 7 Gy et huit présentaient des signes graves d'un syndrome aigu d'irradiation. Les traitements classiques de l'aplasie, complétés par l'administration d'un facteur de croissance hématopoïétique (GM-CSF), n'ont pas pu empêcher le décès de quatre personnes, pour lesquelles les doses reçues ont été évaluées entre 4,5 et 6 Gy. En outre, vingt-huit personnes ont souffert de brûlures, avec des lésions graves pour une dizaine d'entre eux, nécessitant des greffes et des amputations. La figure 10 montre une brûlure radiologique de la main, typique des lésions induites par le césium 137. La dispersion considérable de la poudre de césium a causé des *contaminations internes* (voies d'entrée cutanée et digestive) dont certaines correspondent à des doses engagées élevées. Pour effectuer les mesures des quantités de césium incorporées par chaque individu, il a fallu construire un appareillage spécial, à cause de la saturation des appareils classiques destinés à la mesure de faibles quantités de radionucléides.

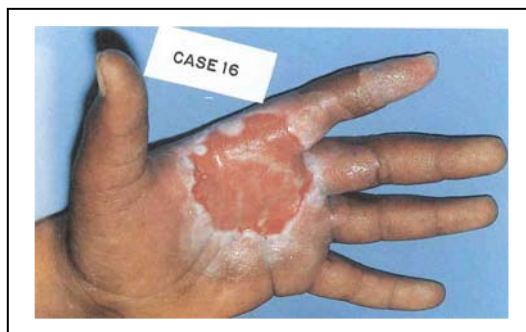


Figure 10 :
Accident de Goiânia, Brésil
(1987)
Brûlure radiologique induite par
le césium 137.
D'après [IAEA, 1988]

Cette construction a pris un mois entier. En avril 1988, six cents personnes avaient été mesurées, parmi lesquelles quatre-vingt-sept avaient des charges corporelles de césium 137 comprises entre 10^3 et 10^9 Bq, correspondant chez trente adultes à des doses engagées comprises entre 0,1 et 1 Gy, et chez les enfants à des doses souvent supérieures (un enfant de six ans avait une *dose engagée* de 4 Gy). Une première décontamination de l'environnement, qui a nécessité la destruction de maisons, n'a été achevée qu'après trois semaines de travaux; elle a nécessité le contrôle des maisons à un kilomètre à la ronde des lieux de l'accident et de 2 000 km de routes. D'octobre à décembre 1987, le bilan global a montré que quatre-vingt-cinq maisons étaient aussi

contaminées, nécessitant l'évacuation de deux cents personnes. La ville et ses environs n'ont été considérés assainis de façon acceptable qu'en mars 1988. Les travaux d'assainissement ont généré d'énormes quantités de déchets, plus ou moins radioactifs, en raison d'un tri insuffisant. Un site d'entreposage a été créé à une trentaine de kilomètres de la ville, dans lequel 3 500 m³ de déchets ont été déposés, constitués de 12 500 fûts et 1 500 conteneurs. L'activité totale récupérée a été estimée à 44 TBq, qui représentaient environ 85 % de la source. Plus de dix ans ont été nécessaires pour que les autorités puissent trouver une solution de stockage définitif acceptable par les populations locales et régionales. L'impact économique de l'accident fut très lourd, et l'économie de toute la région a été affectée.

A **Bangkok**, Thaïlande, une source de radiothérapie de cobalt 60, non utilisée depuis son achat en 1974, a été volée le 25 ou le 26 janvier 2000 dans un entrepôt, puis rapidement revendue. Pendant près de trois semaines, treize personnes (les quatre voleurs, deux jeunes ferrailleurs, le patron d'une boutique d'occasions et six membres de sa famille) ont subi des surexpositions plus ou moins localisées. Dix d'entre elles furent hospitalisées pour hémorragies et brûlures graves [*Suzuki, 2000 ; IAEA, 2002*]. La relation de cause à effet fut établie très tardivement. Trois victimes, âgées de dix-huit, vingt-trois et quarante-quatre ans, décédèrent au cours du deuxième mois suivant le vol de la source. Les informations sur les autres blessés ont été contradictoires ; sans doute afin d'éviter une panique parmi la population, et devant le nombre très élevé de personnes pouvant avoir été exposées, les autorités ont été particulièrement silencieuses. Il a été néanmoins établi qu'une dizaine de victimes ont nécessité des soins intensifs et que certaines ont subi des amputations. Quarante-quatre personnes, dont cinq femmes enceintes, ont présenté des signes éventuellement attribuables à l'irradiation. Cet accident a été considéré comme une catastrophe nationale. Le manque de transparence des acteurs politiques a favorisé les informations les plus invraisemblables.

A **San José**, Costa Rica, la surexposition de cent quatorze malades, dont des enfants, dans un hôpital entre le 26 août et le 27 septembre 1996, a été considérée à juste titre comme une tragédie par tout le pays. Une erreur d'étalonnage d'une source neuve de cobalt 60 dans une unité de radiothérapie a eu pour résultat d'augmenter les doses reçues de 50 % à 60 % par rapport aux doses prescrites ; l'erreur provenait d'une confusion sur l'unité de temps entre la seconde et le centième de minute [*IAEA, 1998c*]. Comme dans toutes les surexpositions lors de cures de radiothérapie, le surdosage ne fut reconnu que lorsque toute une série de malades ont présenté des signes cliniques patents permettant d'évoquer une anomalie du traitement. C'est la raison pour laquelle il s'est écoulé

un mois entier avant que l'erreur ne fut reconnue et l'appareil mis hors service. La surexposition a eu des conséquences très sérieuses, parfois aggravées par les conditions limites de certains traitements (fractionnements insuffisants, champs excessifs, etc.). Cet accident a causé des effets dramatiques chez quatre malades (tétraplégie, paraplégie, démyélinisation de la moelle cervicale ou dorsale, effets digestifs et cutanés graves), des effets marqués évolutifs chez seize autres, des risques pour l'avenir chez vingt-six autres ; seuls vingt-deux patients n'ont pas souffert de l'accident, en raison de l'arrêt du traitement avant que le surdosage ne soit effectif. Les figures 11 à 15 montrent les lésions apparues chez certains des patients à la suite du surdosage (les photos ont été prises en 1997, un an après l'accident). Un certain nombre de malades avaient commencé leur traitement à la fin du mois de septembre, juste avant la découverte de l'erreur ; la plupart de ces patients n'ont pas pu poursuivre leur traitement en raison du manque de disponibilité des deux seuls appareils de radiothérapie qui restaient opérationnels dans tout le pays ; de ce fait, ils ont reçu des doses inférieures et parfois très inférieures aux doses prescrites et leurs chances de guérison ont été fortement compromises. L'estimation du nombre exact de décès directement attribuables au surdosage accidentel est difficile [IAEA, 1998c]. Parmi les soixante et un décès qui eurent lieu au cours des deux années suivantes, il est vraisemblable que treize furent dus à l'erreur d'étalonnage et que quatre victimes développèrent des complications qui ont pu être les causes principales de la mort. Parmi les cinquante et un patients encore en vie en octobre 1998, deux souffraient de complications catastrophiques et douze présentaient des séquelles marquées et invalidantes [Mettler, 2001c]. Le bilan global est difficile à établir sur une plus longue période, car la plupart des malades souffraient d'affections cancéreuses rapidement mortelles.

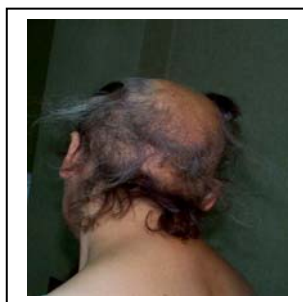


Figure 11 :
A gauche: Epilation permanente à la suite d'une dose reçue de 60 Gy (champ : 15 x 12 cm), pour une métastase d'un cancer du col de l'utérus. Photo : J.C. Nénot

Figure 12 :
A droite: Séquelles cutanées d'irradiations de colonne vertébrale (31 X 6 cm thoracique, 19 x 6 cm lombaire). Même malade qu'en 11. Noter la solution de continuité entre les deux champs vertébraux. Photo : J.C. Nénot



Figure 13 :
A gauche : Lésions cutanées permanentes à la suite d'une dose reçue de 58 Gy (champ : 16 x 10 cm), pour côte lytique ; malade âgé de soixante-trois ans. Photo : J.C. Nénot.

Figure 14 :
A droite : Enfant de 3 ans, handicapé moteur grave, muet, à la suite d'une dose reçue de 58 Gy au crâne (champ : 16 x 9 cm), pour une métastase d'un cancer des testicules. Photo : J.C. Nénot.



Figure 15 :
Epilation permanente chez une fillette de six ans, à la suite d'une dose reçue de 63 Gy au crâne (champ : 15 x 12 cm), pour un médulloblastome. Photo : J.C. Nénot

Les enseignements de ces accidents sont les suivants :

- Ces accidents ont un potentiel de survenue inadmissible.
 - Les facteurs communs à ces accidents catastrophiques et à ceux dus à la perte de petites sources industrielles - absence ou carence de la réglementation, absence de suivi des sources, formation et responsabilisation insuffisantes du personnel - constituent de sérieux handicaps à la prévention.
 - Un autre facteur commun mérite d'être individualisé : en matière de traitement ou de suivi médical, les moyens disponibles sont insuffisants ou inadaptés.
 - L'accident de Costa Rica souligne l'importance pour la prévention d'erreurs graves de l'assurance de la qualité en radiothérapie et de la formation du personnel. En cas d'accident de surdosage, il est essentiel de mettre en place un suivi médical et psychologique rigoureux des survivants pendant au moins cinq ans, en les regroupant par type de pathologie ; ceci permet d'améliorer les traitements, de conforter les malades et d'en tirer des enseignements.
-

5/ Accidents secrets, d'origine militaire

Les accidents décrits ci-après, survenus dans le domaine militaire, constituent de bonnes illustrations de la guerre froide. L'apaisement des relations entre l'ouest et l'est ne permet cependant pas d'affirmer que la transparence totale est devenue de mise pour les accidents, même les plus anciens. Les grandes puissances nucléaires n'ont sans doute pas levé entièrement le voile sur tous les accidents qui ont jalonné la course aux armements. En effet, leur révélation pourrait causer de graves tensions politiques et leur description dévoiler des secrets militaires ou industriels. Des exemples démonstratifs sont fournis par la gestion désastreuse des installations du complexe militaire soviétique dans les années 50 et 60 et les pertes en mer d'engins nucléaires par les deux superpuissances soviétique et américaine. Un accident survenu lors d'un essai d'engin nucléaire français au Sahara en 1962, bien qu'il n'ait causé aucune surexposition détectable, est exemplaire du secret qui pesait à l'époque sur ce type d'activité. Deux exemples de contamination massive de territoires étendus sont fournis par la chute d'armes nucléaires ; ces contaminations ont résulté d'accidents d'aviation : le premier en Espagne en 1966, le second au Groenland en 1968.

A **Tcheliabinsk**, Oural (29 septembre 1957), une très large étendue de territoires de la région de Kyshtym a été contaminée par un rejet accidentel de produits de fission, à la suite de l'explosion d'une cuve, située dans une installation secrète datant de l'immédiat après-guerre. Cet accident a été révélé en 1990 par un réfugié politique [*Nénot, 1994b ; Nénot, 2001*]. La population était déjà chroniquement exposée depuis le début des années 50 par les rejets considérables du complexe militaire, dont près de 40 EBq dans les eaux de rivière. Dans les mois qui ont suivi l'accident, 7 500 habitants de vingt villages ont du être évacués de façon définitive.

L'accident survenu en 1961 dans l'**Atlantique** montre les conséquences que peut avoir la recherche du secret à tout prix : pour ne pas abandonner un sous-marin nucléaire et risquer de le voir récupéré par

des armées rivales, l'équipage a procédé à des réparations de fortune sur le circuit de refroidissement, au cours desquelles plusieurs membres de l'équipage ont reçu de très fortes doses, responsables de huit décès. D'autres accidents impliquant des sous-marins nucléaires de l'ex-URSS ont été partiellement rapportés ; les connaissances sur ce genre d'accident et sur leurs conséquences ne sont encore que très fragmentaires et sujettes à caution.

Bien qu'elles ne puissent pas être qualifiées d'accidentelles, les pertes d'armes et de réacteurs nucléaires militaires ne peuvent pas être passées sous silence ; les causes ont été multiples : accidents aériens, tirs ratés, réacteurs de navires coulés, réacteurs de satellites normalement désintégrés lors de leur retour dans l'atmosphère. Du côté américain, on décompte sept pertes en mer d'armes nucléaires entre 1950 et 1965, trois missiles abîmés en mer, deux sous-marins perdus avec leurs réacteurs et trois chutes de satellite [Mettler, 1990] ; du côté soviétique, on dénombre sept naufrages de sous-marins porteurs d'armes entre 1968 et 1989 ainsi qu'un destroyer perdu en Mer Noire en 1974.

Au **Hoggar, Sahara** (1^{er} mai 1962), lors d'un essai d'une arme nucléaire, la sous-évaluation de sa puissance, combinée à une appréciation erronée des conditions météorologiques, a causé l'exposition du site d'observation du tir par les rejets atmosphériques poussés par le vent. Le contrôle radiologique des observateurs, après leur rapatriement d'urgence en France, n'a décelé aucune contamination.

A **Damascus**, Arkansas, USA (1-19 décembre 1980), où était situé un site militaire de missiles nucléaires, une fusée Titan II a explosé à la suite d'une fuite de carburant et le premier étage s'est désintégré [Mettler, 1990]. Un opérateur est mort sur le coup et la contamination des environs du pas de tir a nécessité d'importantes opérations de nettoyage, impliquant une centaine de personnes pendant plus d'un mois.

A **Palomarès**, Espagne (17 janvier 1966), à la suite de la collision d'un bombardier porteur d'armes atomiques et de son avion ravitailleur en vol, le contenu de trois engins nucléaires a été dispersé au sol (une bombe a été peu endommagée, alors que les deux autres ont été fragmentées par l'explosion du détonateur) ; une quatrième bombe s'est échouée en mer par 1 000 mètres de profondeur [Mettler, 1990]. Sept membres de l'équipage ont trouvé la mort dans l'accident d'avion et quatre ont survécu. Plus de six cents personnes ont participé à la chasse aux débris et au nettoyage. Des quantités énormes de sol furent contrôlées. Sur la base d'un niveau d'intervention de 864 kBq m^{-2} ($32 \text{ } \mu\text{Ci m}^{-2}$) (niveau de contamination au-dessus duquel il a été décidé d'engager des actions pour retirer la terre contaminée), environ 150 m^3

de sol et de végétaux ont dû être transportés en Caroline du Sud (USA) pour y être enterrés (site de la Savannah River). La localisation et la récupération de l'engin perdu en mer n'eurent lieu que le 7 avril, soit environ quatre mois plus tard. Un suivi de la contamination des populations fut entrepris, justifié par le fait que le village de Palomarès n'avait pas été évacué. Aucune contamination n'a été observée chez les habitants.

A **Thulé**, Groenland (21 janvier 1968), l'écrasement d'un bombardier américain sur la banquise a causé l'explosion et la dispersion du contenu de quatre engins nucléaires [Mettler, 1990]. L'accident a causé la mort immédiate d'un membre de l'équipage. L'intervention, compliquée par les conditions extrêmes de la nuit polaire, a mobilisé plus de sept cents militaires, aidés par des scientifiques et des civils américains et danois. La quantité de plutonium dispersée a été estimée à plus de 3 kg, dont la plus grande partie a été fixée par la couche superficielle de la glace. Les mesures d'assainissement ont consisté à rassembler la glace, la neige et les débris dans 167 réservoirs de 100 m³, qui ont ensuite eu le même sort que les déchets de l'accident de Palomarès. La contamination a pu être ramenée à des niveaux comparables à ceux du Grand Nord. La polémique sur les conséquences de l'accident sur l'environnement et les résultats des mesures de nettoyage n'est toujours pas terminée, pas plus que celle qui concerne de possibles effets sur la santé des travailleurs, particulièrement les civils danois, qui sont intervenus sur la glace dans des conditions de protection parfois précaires. La véracité de la récupération totale des contenus des engins, peut-être immergés sous la glace, est régulièrement mise en cause.

Les leçons de ces accidents, de causes et de conséquences variées, sont évidentes :

- **Les impératifs militaires relèvent beaucoup plus du secret et de la réalisation d'armes nucléaires que de soucis de sûreté et de protection. Seul un changement radical des mentalités, en premier lieu celles des responsables politiques, souligné par un souci de transparence, permettrait aux militaires de certains pays de conférer aux installations dont ils ont la responsabilité un niveau de sûreté comparable à celui des meilleures installations civiles.**
- **Il est évident que les connaissances sur ce genre d'accidents et sur leurs conséquences ne sont, encore aujourd'hui, que très fragmentaires et incomplètes.**

6/

Conclusions

Pour tirer les leçons du retour d'expérience de ces accidents, deux démarches distinctes peuvent être menées : la première vise à identifier les points communs aux diagnostics de ces accidents et des maladies présentées par les victimes, alors que la seconde s'attache à ceux présentés par le traitement technique de l'accident et aux traitements médicaux des victimes.

6/1

Diagnostic de l'accident

Les cas d'accidents reconnus tardivement sont trop nombreux. Il est possible d'imaginer que des accidents graves, comparables dans leurs circonstances, aient pu passer inaperçus. Quel que soit le délai écoulé entre l'événement initial et la découverte de l'accident, le temps perdu est porteur de conséquences graves : accroissement du nombre de victimes, aggravation de leur état, difficultés de diagnostic et de traitement. La prévention est essentielle et doit exister à tous les niveaux : réglementations adaptées, formation du personnel, volonté de transparence. Ces conditions, qui relèvent du bon sens, permettraient de réduire le nombre de sources perdues et d'empêcher des personnes non averties d'y accéder. Il serait souhaitable que les petites sources soient aisément repérables et que le danger qu'elles représentent soit rapidement identifiable ; par exemple, la présence d'un logo universel inscrit sur les sources, signalant le danger et sa nature, pourrait dissuader les individus de la population mis fortuitement en présence d'objets inconnus de les manipuler et de les conserver. L'Agence Internationale de l'Énergie Atomique (AIEA) étudie cette question, qui, en fait, est plus facile à énoncer qu'à résoudre, en raison notamment de la très petite taille de ce type de source. Des efforts doivent aussi porter sur les facteurs humains : la plupart des accidents incluent dans les arbres

d'événements de leurs causes des défaillances humaines comportant des violations graves des règles élémentaires de sécurité, qu'il convient de prévenir.

6/2

Diagnostic des maladies radioinduites

La gravité des maladies induites par les rayonnements n'est pas évidente d'emblée à partir des seuls signes médicaux. La dosimétrie physique n'a pas toujours la place qu'elle devrait occuper, mais elle a ses limites : résultats parfois incertains, reconstitutions tributaires de témoignages humains. La dosimétrie biologique constitue un passage obligatoire pour estimer les doses absorbées, mais possède aussi ses limites. Seule la combinaison de méthodes physiques et biologiques permet d'accéder aux deux paramètres essentiels au diagnostic et au pronostic : *dose absorbée* moyenne, notamment au niveau de la moelle osseuse, et distribution de cette dose dans l'organisme.

6/3

Traitement de l'accident

Le traitement d'un accident qui implique un grand nombre de victimes, réelles ou potentielles, exige des moyens considérables. La condition première de la réussite est la prise de conscience de la dimension du problème par les autorités, qui doivent se préparer à ce type de situation. L'expérience montre que les aspects psychosociologiques peuvent prendre le pas sur les aspects médicaux et sanitaires. La communication est particulièrement délicate et doit impliquer de nombreux relais : autorités, ingénieurs en sûreté, médecins avertis dans le domaine des pathologies radioinduites, victimes, population et médias.

6/4

Traitement médical de l'accidenté

Les problèmes posés par le traitement des affections radioinduites dépendent essentiellement de la localisation de l'exposition. Le traitement d'une surexposition globale n'a rien de commun avec celui d'une exposition localisée.

6/4/1

Exposition globale

Le traitement médical d'un irradié global est délicate et implique de nombreux spécialistes dont la coordination n'est pas toujours aisée. Le traitement des aplasies médullaires a bénéficié de progrès considérables depuis deux décennies. Les espoirs fondés dans les années 70 sur la greffe de cellules souches hématopoïétiques, considérée alors comme le traitement de choix des aplasies profondes causées par une surexposition accidentelle, ont été déçus après les tentatives infructueuses chez les irradiés graves de l'accident de Tchernobyl. En raison de la rareté des accidents, il sera difficile de démontrer la réelle efficacité des facteurs de croissance hématopoïétiques dans le traitement des aplasies accidentelles ; leur efficacité est cependant fortement supposée sur la base des résultats d'études expérimentales et cliniques. Ces résultats ont amené les autorités de santé américaines (FDA) à autoriser l'utilisation de facteurs de croissance chez l'homme dans le cas d'une irradiation accidentelle. Les patients peuvent maintenant dépasser le stade de l'aplasie, mais sont menacés par la défaillance d'autres organes et systèmes. Le tableau 2 montre que le décès des victimes est le plus souvent dû à la défaillance multiple d'organes et de systèmes. Il reste de nombreux progrès à faire pour maîtriser l'ensemble des syndromes induits par les rayonnements.

Type de traitement	Lieu, Date	Nombre de morts	Survies (jours)	Cause de la mort (organe défaillant)
CONVENTIONNEL (transfusions)	Mexique 1962	4	38-210	moelle osseuse
	Italie 1975	1	13	système nerveux, infection
	Algérie 1978	1	53	poumon, moelle, brûlures
	Norvège 1982	1	13	moelle osseuse, rein
	Maroc 1984	8	45	moelle osseuse
	Chine 1992	3	14	moelle osseuse
	Estonie 1994	1	35	moelle osseuse, rein
	Russie 1997	1	3	cœur
TRANSPLANTATION (moelle osseuse ou foie fœtal)	Ukraine 1986	28	30 ^(c)	brûlures, GVHD ^(a)
	Israël ^(b) 1990	1	36	poumon, tube digestif
	Japon ^(b) 1999	1	83	rein, foie, poumon, cœur
FACTEURS DE CROISSANCE (G-CSF, GM-CSF, IL-3)	Brésil 1987	4	35	moelle osseuse
	Salvador 1989	1	180	poumon
	Belarus 1991	1	113	poumon, lésions multiples

Tableau 2 :
Traitements médicaux et causes de la mort dans quelques accidents mortels.

(a) GVHD: Graft-Versus-Host-Disease

(b) Les victimes des accidents d'Israël et du Japon, qui apparaissent ici dans la case transplantation, ont aussi reçu des facteurs de croissance (Israël : GM-CSF + IL-3, Japon : G-CSF)

(c) durée de survie moyenne des vingt-huit victimes décédées.

6/4/2

Exposition localisée

Dès que la couche basale de la peau a reçu des doses qui aboutissent à la nécrose et que la taille des brûlures devient importante, le traitement des brûlures radiologiques est extrêmement délicat. Force est de constater que peu de progrès ont été faits au cours des cinquante dernières années. Cependant, l'application aux lésions radiologiques de techniques éprouvées dans d'autres domaines de la médecine autorise de sérieux espoirs, qu'il s'agisse du diagnostic ou du traitement. Une des victimes de l'accident de Géorgie, dont les trente-trois lésions composent une illustration des différentes formes cliniques des brûlures radiologiques, constitue un exemple vivant des progrès obtenus par les techniques modernes. Aux plans du diagnostic et du pronostic, le bilan de l'extension des lésions est maintenant possible grâce à la reconstitution dosimétrique par simulation numérique et par la possibilité de mesurer la dose sur certains matériaux grâce à la technique RPE. Au plan du traitement, l'utilisation de peau artificielle a démontré ses avantages par rapport aux techniques classiques de greffes [Carsin, 2002]. Les greffes classiques de peau doivent être pratiquées tôt après l'irradiation afin d'éviter des surinfections redoutables, mais sont souvent rejetées et ne peuvent pas être répétées indéfiniment. En revanche, la couverture par un derme artificiel recouvert d'une couche siliconée permet, sous contrôle visuel direct, la reconstitution des tissus sous-jacents et du système capillaire. Très récemment, l'utilisation de cellules souches mésenchymateuses cultivées, en provenance de la victime, a montré son efficacité sur la cicatrisation et les perturbations physiopathologiques radioinduites. L'expérience est encore toutefois trop limitée pour affirmer que ces techniques constituent la voie d'avenir.

7/

Glossaire

(Ces définitions, données par ordre alphabétique, correspondent au contexte du rapport)

Accélérateur linéaire :

1. **Accélérateur** : dispositif servant à communiquer, sous l'action d'un champ électrique, une énergie cinétique très élevée à des particules chargées.

2. **Accélérateur linéaire** : accélérateur dans lequel l'accélération des particules est liée à la propagation d'un champ à haute fréquence à l'intérieur d'un guide d'ondes rectiligne ou de plusieurs cavités alignées. Les accélérateurs linéaires connaissent un certain développement en radiothérapie, car leurs propriétés permettent de délivrer une dose relativement homogène dans un volume restreint et d'atteindre des tissus superficiels sans exposer les tissus profonds (le gradient de dose chute rapidement avec la profondeur). Les accélérateurs linéaires sont aussi utilisés dans l'industrie, par exemple pour la polymérisation et la réticulation de plastiques, la stérilisation, etc.

Activité : nombre de désintégrations nucléaires spontanées se produisant par unité de temps au sein d'un radionucléide. L'unité d'activité dans le système international SI correspond à une désintégration par seconde et porte le nom de becquerel (Bq). Comme le Bq représente une activité extrêmement petite, les activités des sources radioactives à l'origine d'accidents sont exprimées en multiples de Bq : kilobecquerel (1 kBq = 10^3 Bq), mégabecquerel (1 MBq = 10^6 Bq), gigabecquerel (1 GBq = 10^9 Bq), terabecquerel (1 TBq = 10^{12} Bq), petabecquerel (1 PBq = 10^{15} Bq), exabecquerel (1 EBq = 10^{18} Bq).

L'unité historique d'activité, qui représente à peu près l'activité d'un gramme de radium, est le curie (Ci) ; un curie correspond à 37 milliards de désintégrations par seconde. La correspondance Ci-Bq est la suivante : 1 Ci = 37 GBq. Les sous-multiples les plus usités du Ci sont le millicurie (1 mCi = 37 MBq), le microcurie (1 μ Ci = 37 KBq), le nanocurie (1 nCi = 37 Bq) et le picocurie (1 pCi = 37 mBq).

Aigu : s'appliquant à une maladie, synonyme d'apparition brusque et d'évolution rapide (opposé à chronique). S'appliquant à une exposition, signifie que l'exposition a duré un temps court. Le syndrome aigu d'irradiation est l'ensemble des signes et symptômes présentés par une personne à la suite d'une exposition courte à de fortes doses de rayonnements de l'ensemble de l'organisme (ou d'une très grande partie de l'organisme).

Allogreffe : greffe sur une personne d'un greffon prélevé sur une autre personne. A l'inverse d'une autogreffe (greffe dans laquelle le greffon provient du sujet lui-même), une allogreffe présente de nombreux risques, dont le principal est la réaction de l'hôte contre le greffon, signe d'histo-incompatibilité, qui peut entraîner de graves complications, comme le rejet du greffon, voire la mort du sujet greffé.

Angiographie : examen radiographique, permettant de visualiser les vaisseaux grâce à l'injection préalable d'un produit de contraste opaque aux rayons X.

Angiosarcome : tumeur maligne, développée aux dépens du tissu conjonctif des vaisseaux sanguins, composée en général de cellules peu différenciées.

Aplasie : synonyme d'atrophie. Aplasie médullaire : signifie la désertification de la moelle, à la suite de la défaillance de la production de cellules sanguines par la moelle osseuse, entraînant une chute grave du nombre des cellules sanguines matures normalement présentes dans le sang (globules rouges, globules blancs et plaquettes) et se traduisant par de l'anémie, une perte des défenses immunitaires et des hémorragies. L'aplasie médullaire grave peut entraîner la mort.

Autogreffe : greffe sur une personne d'un greffon prélevé sur la même personne. A l'inverse de l'allogreffe, l'autogreffe ne suscite aucune réaction néfaste, puisque les défenses immunitaires naturelles de l'organisme ne reconnaissent pas le greffon comme un corps étranger.

Becquerel (Bq) : unité d'activité. Voir *Activité*.

Cellule souche : première étape de la vie d'une cellule ; c'est une cellule encore indifférenciée (à potentiel multiple), qui donnera naissance successivement à une cellule en voie de différenciation, puis à une cellule différenciée (dans une lignée cellulaire) et enfin à une cellule mature fonctionnelle d'un système donné. **Cellule souche hématopoïétique** :

cellule qui aboutira, après maturation, à une cellule du système sanguin.

Cellule souche mésenchymateuse : cellule qui aboutira, après maturation, à une cellule du tissu mésenchymateux (tissu conjonctif de soutien, issu du mésoderme).

Contamination interne : incorporation par inhalation ou par ingestion de radionucléides qui se répartissent dans les différents tissus et organes, selon une cinétique biologique qui leur est propre, et délivre une dose à l'ensemble des organes tant que dure leur présence dans l'organisme.

Criticité : état d'un système devenu critique, c'est-à-dire que ce système est le siège d'une réaction nucléaire en chaîne (avec un facteur de multiplication effectif égal à l'unité). Un système (ou un réacteur nucléaire) devient critique quand le taux de production de neutrons, à l'exclusion des sources de neutrons dont les intensités sont indépendantes du taux de fissions, est exactement égal au taux de disparition des neutrons.

Curie (Ci) : unité historique d'activité. Voir *Activité*.

Curiothérapie : traitement médical consistant à insérer dans un tissu ou un organe un produit radioactif destiné à détruire les cellules malignes présentes dans ce tissu ou cet organe. Forme de radiothérapie pour des organes accessibles, comme la langue, la prostate, etc.

Dose : qualifie d'une manière générale la quantité d'une substance délivrée. Dans le domaine de la radioactivité, et pour les besoins de la radioprotection, il existe plusieurs expressions de la dose.

Dose absorbée : quantifie l'interaction des rayonnements avec la matière et correspond à l'énergie cédée à l'unité de masse exposée aux rayonnements ; elle est exprimée en joule par kilogramme (J kg^{-1}) et son unité est le gray (Gy). La dose absorbée constitue l'indicateur des effets à fortes doses. Le débit de dose absorbée est exprimé en gray par unité de temps (Gy h^{-1} , Gy s^{-1} ...).

Dose équivalente : est le produit de la dose absorbée par un facteur de pondération qui tient compte de la qualité du rayonnement, qui dépend de la densité d'ionisation le long du parcours des particules ionisantes, mesurée par le transfert d'énergie linéique (TEL). Ce facteur de pondération reflète la nocivité d'un rayonnement donné. La dose équivalente permet d'exprimer le risque de cancers radioinduits dans un tissu ou organe. L'unité de dose équivalente est le sievert (Sv).

Dose efficace : rend compte de la sensibilité propre de chaque tissu ou organe aux rayonnements. C'est le produit de la dose équivalente par un facteur de pondération spécifique à un tissu ou à un organe donné. C'est donc une grandeur pondérée deux fois qui rend compte du détriment total (somme de toutes les affections à long terme causées par les rayonnements, cancers mortels et non mortels, maladies non cancéreuses, infirmités, séquelles, effets génétiques, etc.). Elle s'exprime en sievert.

Dose engagée : se rapporte à l'exposition interne après l'incorporation d'une substance radioactive. Elle représente la dose qui sera reçue par un tissu ou organe, soit jusqu'à la décroissance totale, soit, si la période effective du radionucléide est supérieure à la durée de vie du sujet, pendant la totalité de l'existence. On admet par convention que l'espérance de vie au moment de l'incorporation est de 50 ans pour un travailleur et de 70 ans pour une personne du public.

Etiologie : étude de la cause d'une maladie.

Exposition : condition par laquelle une personne est soumise à l'action d'un agent chimique ou physique pendant un certain temps. Dans le domaine des rayonnements ionisants, définit l'action ou la condition dans laquelle une personne est soumise à l'irradiation. Peut être externe (irradiation par une source située à l'extérieur du corps) ou interne (irradiation par une source située à l'intérieur du corps). Le terme est aussi employé en radiothérapie pour exprimer la quantité d'ionisation produite dans l'air par les rayonnements.

Exposition aiguë : se dit d'une exposition reçue pendant une période de temps courte. Opposée à chronique. Voir *Aigu*.

Facteurs de croissance (de l'hématopoïèse) : ils font partie de la famille des facteurs de régulation de l'hématopoïèse, molécules naturelles présentes dans la circulation sanguine, qui jouent un rôle prépondérant dans la régulation de la prolifération ou de la différenciation des lignées cellulaires chez l'homme. Dans l'état actuel des connaissances, les facteurs activateurs sont de loin les plus importants. Les principaux facteurs de croissance hématopoïétique identifiés sont fabriqués par des méthodes de génie génétique. Ils sont dénommés suivant leur provenance et leur mode de découverte : IL (pour *interleukine*) suivi d'un numéro, ou CSF (pour *colony stimulating factor*) précédé des initiales de la cible. Six facteurs jouent un rôle essentiel dans la stimulation hématopoïétique : l'IL-3 qui agit sur les cellules pluripotentes, le GM-CSF

qui stimule les séries myéloïde et monocyttaire, le G-CSF qui stimule exclusivement la lignée granulocytaire, le MCSF qui agit sur les lignées monocyttaire ou macrophagiques selon son origine, le SCF (stem cell factor) qui agit sur les cellules souches et l'érythropoïétine (EPO) qui agit sur la prolifération et la différenciation des cellules de la lignée rouge.

Fission (nucléaire) : division d'un noyau lourd en deux parties (rarement plus) dont les masses sont du même ordre de grandeur, habituellement accompagnée de l'émission de neutrons, de rayonnement gamma et, rarement, de petits fragments nucléaires chargés. A distinguer de la fusion nucléaire, qui est une réaction au cours de laquelle deux noyaux légers s'unissent pour former un noyau plus lourd, et de la fusion thermonucléaire, qui est provoquée par l'agitation thermique des noyaux en cause et qui libère une énergie considérable.

Gammagraphie : radiographie utilisée pour étudier la structure interne de matériaux opaques, à l'aide de rayons gamma ou X. Utilisée largement dans l'industrie, le plus souvent à l'aide de sources d'iridium 192, de césium 137 ou de cobalt 60, notamment pour vérifier des soudures (tuyauteries par exemple). Utilisé aussi dans le domaine médical, notamment pour explorer le système vasculaire et la structure osseuse.

Gray (Gy): unité de dose absorbée. Voir *Dose*.

Greffon : fragment de tissu ou d'organe transplanté. Les greffes de cordon ombilical et de foie fœtal (administrées par voie sanguine, comme les greffons de moelle osseuse) présentent l'intérêt de ne susciter de la part du receveur que peu de réactions néfastes d'ordre immunitaire, en raison de l'état de différenciation précoce des tissus du greffon.

Hématopoïèse : formation des cellules sanguines dans les différents tissus qui les produisent (tissus hématopoïétiques), comme la moelle osseuse ou le tissu réticuloendothélial (rate, foie, thymus...).

Irradiateur (industriel) : équipement conçu pour irradier à de fortes doses, comprenant une puissante source de rayonnements et les protections appropriées. En général la source est constituée de cobalt 60 ou de césium 137. Utilisé pour stériliser du matériel (médical par exemple) ou pour irradier des produits alimentaires afin d'empêcher ou retarder le développement de parasites et de bactéries ou pour freiner le mûrissement de fruits et légumes rapidement périssables.

Isodose (courbe isodose) : de même que la courbe de niveau sert en géographie pour représenter le relief, la courbe isodose sert à délimiter les surfaces de la peau ou les volumes de l'organisme ayant reçu une même dose. Très utile pour porter un pronostic, soit vital en cas de surexposition globale du corps entier, soit fonctionnel en cas de surexposition localisée, avant la déclaration de signes cliniques patents.

Mésothéliome : tumeur maligne de la plèvre, classiquement produite par l'amiante ; peut être produit par le dépôt de radionucléides dans la plèvre.

Myélite : phénomène inflammatoire de la moelle épinière, se traduisant par des signes neurologiques et pouvant être dégénératif.

Ostéosarcome : tumeur maligne développée aux dépens du tissu conjonctif de l'os, ou sarcome renfermant des éléments osseux.

Période (d'un radionucléide) :

1. **Période physique**, aussi appelée demi-vie radioactive ; elle exprime le temps nécessaire pour que l'activité d'un radionucléide donné, présente dans un échantillon, soit réduite à la moitié de sa valeur d'origine.

2. **Période biologique**, aussi appelée demi-vie biologique ; elle exprime le temps nécessaire pour que l'activité d'un radionucléide, incorporé par un système biologique vivant, soit réduite de moitié par les processus biologiques lorsque l'élimination est approximativement exponentielle.

3. **Période effective**, aussi appelée demi-vie effective ou résultante ; elle exprime le temps nécessaire pour que l'activité d'un radionucléide présent dans un système biologique vivant soit réduite de moitié, par suite à la fois de la décroissance radioactive et de processus biologiques. C'est la combinaison des deux périodes physique et biologique.

Sievert (Sv) : unité utilisée en radioprotection humaine pour exprimer la dose équivalente et la dose efficace. Voir *Dose*.

Rayonnements α , β , γ : émissions corpusculaires et ondulatoires d'énergie. Les rayons α sont constitués par des noyaux d'atomes d'hélium ionisés. Les rayons β correspondent à des électrons. Les rayons γ sont des rayonnements électromagnétiques de très haute énergie et de plus faible longueur d'onde que les rayons X.

Résonance paramagnétique électronique (RPE) : technique qui permet d'apprécier la dose reçue par un matériau, grâce à la détection des

radicaux libres créés par l'exposition aux rayonnements, dont la densité massique est proportionnelle à la dose. La technique consiste à observer la résonance créée lors de l'absorption d'une micro-onde par les électrons non appariés d'un matériau, lorsque celui-ci est soumis à un champ magnétique. Dans certains matériaux, comme l'os, les dents, les cheveux et la peau, les espèces radicalaires possèdent une durée de vie supérieure à l'année, ce qui rend possible leur utilisation à des fins dosimétriques.

Source scellée : qualifie une source radioactive confinée de façon permanente et sûre dans une enveloppe conçue de telle sorte qu'elle empêche toute fuite de produit.

Source non scellée : s'oppose à source scellée. Les sources non scellées sont utilisées en médecine nucléaire pour le radiodiagnostic ou la radiothérapie, sous forme liquide ou solide.

Symptomatologie clinique : ensemble des phénomènes et caractères observables liés à un état ou à une évolution, qui permettent de déceler et de caractériser une maladie. Elle permet de poser un diagnostic et d'évaluer un pronostic.

Typage : classification en types de différents éléments, permettant d'apprécier la compatibilité cellulaire préalablement à la transfusion d'éléments sanguins ou à la greffe d'un organe. Dans ces cas, le bilan comprend la détermination des groupes sanguins : ABO et rhésus, phénotype, recherche d'agglutinines irrégulières, groupe HLA.

Uranium enrichi : l'uranium existe à l'état naturel sous forme d'un mélange de trois isotopes : l'uranium 235, l'uranium 238 et l'uranium 234. L'uranium 238, de loin le plus abondant (99,28 %), est un matériau fertile, c'est-à-dire susceptible d'être transformé, directement ou indirectement, en un nucléide fissile par capture de neutron. Il est ainsi possible de produire du plutonium à partir de l'uranium 238. L'uranium 235 dont la proportion dans l'uranium naturel est faible (0,7 %) est le combustible nucléaire le plus courant. L'uranium 234 n'existe qu'en très faible proportion (0,06 ‰). L'enrichissement désigne l'augmentation de la proportion en uranium 235 ; il s'effectue grâce à diverses méthodes dites de séparation des isotopes, comme la séparation gazeuse et la séparation par centrifugation en cascade (la plus utilisée actuellement).

8/

Références

Andrews, 1963

Andrews, G.A.

Mexican Co 60 radiation accident. *Isotopes and radiation technology*, 1, n° 2, 200-201, 1963

Ash, 1994

Ash D., Bates T.

Report on the clinical effects of inadvertent underdosage in 1045 patients. *Clin. Oncol.*, 6 (4), 214-226, 1994

ASN, 2006a

Autorité de sûreté nucléaire. *Communiqué de presse*, 21 avril 2006. Accident de radiothérapie à Lyon : l'ASN engage tous les services de radiothérapie à améliorer la prévention des accidents

Baranov, 1990

Baranov A.E. and Guskova A.K.

Acute radiation disease in Chernobyl accident victims. In: *The medical basis for radiation accident preparedness II. Clinical experience and follow-up since 1979*. Ricks R.C. and Fry S.A. Eds. pp 79-87, Elsevier/North Holland, New York, 1990

Bailey, 1977

Bailey E.D., Wukasch M.C.

A case of felonous use of radioactive materials. Recueil des communications, IVe Congrès de l'Association Internationale de Radioprotection (IRPA), Paris, 24-30 avril 1977, vol 3, 987-990, 1977

Baron, 1969

Baron J.M., Yachnin S., Polcyn R., Fitch R. and Sturner W.Q. Accidental radiogold (¹⁹⁸Au) liverscan overdose with fatal outcome. In: *Handling of radiation accidents*, Proceedings of an IAEA Symposium, 19-23 May 1968. International Atomic Energy Agency, Vienna, 399-414, 1969

Cardis, 1996

Cardis E.

Estimated long term health effects of the Chernobyl accident. In : *One decade after Chernobyl. Summing up the consequences of the accident.* pp 241-279, IAEA, Vienna, 1996

Cardis, 2006

Cardis E., Howe G, Ron E, et al.

Cancer consequences of the Chernobyl accident : 20 years on. *J. Radiol. Prot.* 26, 127-140, 2006

Carsin, 2002

Carsin H., Stéphanazzi J., Lambert F., Curet P.M., Gourmelon P.

Moyens de recouvrement du brûlé grave : réflexions sur leur application aux lésions radiologiques. *Radioprotection*, Vol 37, n° 1, 13-25, 2002

Chanteur, 1992

Chanteur J.

Un accident d'irradiation. *Médecins et rayonnements ionisants.* n°3, Juillet 1992, 5-6, 1992

Chambrette, 2001

Chambrette V., Hardy S., Nénot J.C., 2001

Les accidents d'irradiation. Mise en place d'une base de données "ACCIRAD" à l'IPSN. *Radioprotection*, Vol 36, n°4, 477-510, 2001

Cohen, 1995

Cohen L., Schultheiss T.E., Kennaugh R.C.

A radiation overdose incident: initial data. *Int. J. Radiation Oncology Biol. Phys.* 33 (1), 217-224, 1995

Collins, 1980

Collins V.P. and Gaulden M.E.

A case of child abuse by radiation exposure. In: *The medical basis for radiation accident preparedness.* Hübner K.F. and Fry S.A. Eds. Elsevier/North Holland, New York, 197-203, 1980

Ellman, 1994

Ellman M.

The increase in death and disease under « katastroika ». *Cambridge Journal of Economics* 18, 329-355, 1994

El Naggar, 1997

El Naggar A.M.

Communication personnelle, 1997

Esco, 1993

Esco R., Lopez P., Bellosta R., Baquedano J.E., Mateo P.
Accidental overirradiation syndrome. *Radiotherapy and oncology*, **28**, 177-178, 1993

Finkel, 1967

Finkel A.J., Miller C.E. and Hasterlik R.J.
Radium induced malignant tumors in man. In: *Delayed effects of bone seeking radionuclides*. C.W. Mays, W.S.S. Jee, R.D. Lloyd, B.J. Stover, J.H. Dougherty and G.N. Taylor Eds., University of Utah Press Public, 195-225, 1967

Gale, 1986

Gale R.P.
Dose injury assessment and medical effects at Chernobyl. In: *Workshop on short-term health effects of reactor accidents*. Bond V.P. and Conkrite E.P. Eds, Brookhaven national Laboratory, BNL 52030/UC 48 (Biology and Medicine – TIC – 4500), 12-13, 1986

Gale, 1987

Gale R.P.
Immediate medical consequences of nuclear accidents: lessons from Chernobyl. *Jama*, Aug 7, **258**, n°5, 625-628, 1987

Gale, 1988

Gale R.P.
Perspective – Medical response to radiation and nuclear accidents. Lessons for the future. *Journal of the National Cancer Institute*, vol 80, 995-997, 1988

Gourmelon, 2006

Gourmelon P.
Communication personnelle, 2006

Guskova, 1987

Guskova A.K.
Early acute effects of the Chernobyl accident. *WHO Expert's meeting*, Copenhagen, 13-14 May 1987

Guskova, 2001

Guskova A.K. and Gusev I.A.
Medical aspects of the accident at Chernobyl. In: *Medical management of radiation accidents. Second Edition*. I.A. Gusev, A.K. Guskova, F.A. Mettler, Eds., pp 195-210 CRC Press, Boca Raton, London, New York, Washington DC., 2001

IAEA, 1988

International Atomic Energy Agency
The radiological accident in Goiânia, IAEA, Vienna, 1988

IAEA, 1990

International Atomic Energy Agency
The radiological accident in San Salvador, IAEA, Vienna, 1990

IAEA, 1993

International Atomic Energy Agency
The radiological accident in Soreq. IAEA, Vienna, 1993

IAEA, 1996a

International Atomic Energy Agency
The radiological accident at the irradiation facility in Nesvizh, IAEA,
Vienna, 1996

IAEA, 1996b

International Atomic Energy Agency
An electron accelerator accident in Hanoi, Vietnam, IAEA, Vienna, 1996

IAEA, 1998a

International Atomic Energy Agency
The radiological accident in Tammiku, Estonia, IAEA, Vienna, 1998

IAEA, 1998b

International Atomic Energy Agency
Goiânia ten years later. IAEA, Vienna, 1998

IAEA, 1998c

International Atomic Energy Agency
Accidental overexposure of radiotherapy patients in San José, Costa Rica,
IAEA, Vienna, 1998

IAEA, 1999

International Atomic Energy Agency
Report on the preliminary fact finding mission following the accident at
the nuclear fuel processing facility in Tokai-mura, Japan. IAEA, Vienna,
1999

IAEA, 2000a

International Atomic Energy Agency
The radiological accident in Yanango, IAEA, Vienna, 2000

IAEA, 2000b

International Atomic Energy Agency
The radiological accident in Lilo, IAEA, Vienna, 2000

IAEA, 2001a

International Atomic Energy Agency
The criticality accident in Sarov. IAEA, Vienna, 2001

IAEA, 2001b

International Atomic Energy Agency
Investigation of an accidental overexposure of radiotherapy patients in Panama. Report of a team of experts, 26 May-1 June 2001, IAEA, Vienna, 2001

IAEA, 2002

International Atomic Energy Agency
The radiological accident in Samut Prakarn. IAEA, Vienna, 2002

IAEA, 2004

International Atomic Energy Agency
Accidental overexposure of radiotherapy patients in Bialystok. IAEA, Vienna, 2004

IAEA, 2005

International Atomic Energy Agency, World Health Organization (WHO), United Nations Development Programme (UNDP), Food and Agriculture Organization (FAO), United Nations Environment Programme (UNEP), United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs (UN-OCHA), United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), the World Bank and the Governments of Belarus, the Russian Federation and the Ukraine.

The Chernobyl Forum. Chernobyl's Legacy: Health, Environmental and Socio-economic Impacts, and recommendations to the Governments of Belarus, the Russian Federation and the Ukraine.

IAEA, Vienna, Sept. 2005

ICRP, 2005

International Commission on Radiological Protection
Protecting people against radiation exposure in the event of a radiological attack. *ICRP Publication 96*, Annals of the ICRP, 35, Elsevier, 2005

IPSN, 1999

Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire
Fiche relative à l'accident survenu le 30 septembre 1999 à Tokai-Mura (Japon). 14 octobre 1999. IPSN Ed, 1999

IPSN, 2002

Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire

Grave accident de source en Géorgie –L'un des irradiés est pris en charge par l'hôpital d'instruction des armées Percy. *Communiqué de presse IPSN*, 22 février 2002

IRSN, 2006a

Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire

L'IRSN confirme qu'un employé d'une installation belge de stérilisation a été gravement irradié par une source radioactive. *Communiqué de presse*, 5 avril 2006

IRSN, 2006b

Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire

Accident de gammagraphie en Afrique : l'IRSN apporte son assistance et mobilise ses experts dans le domaine de l'irradiation accidentelle. *Communiqué de presse*, 8 septembre 2006

IRSN, 2006c

Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire

Impact du polonium 210 sur l'homme. Communiqué, 28 novembre 2006

Ivanov, 1994

Ivanov V.K. et al.

Planning of long term radiation and epidemiological research on the basis of the Russian National Medical and Dosimetric Registry, In: *Nagasaki Symposium on Chernobyl: Update and Future*. Shigenobu Nagasaki Ed., Elsevier, (1994) 203–216

Ivanov, 1999

Ivanov V.K., Gorsky A.I., Tsyb A.F. Maksyutov M.A. and Rastopchin E.M.

Dynamics of thyroid cancer incidence in Russia following the Chernobyl accident. *J. Radiol. Prot.*, **19**, n° 4, 305-318, 1999

Jammet, 1980a

Jammet H., Gongora R., Le Gô and Doloy M.T.

Clinical and biological comparison of two acute accidental irradiations: Mol (1965) and Brescia (1975). In: *The medical basis for radiation accident preparedness*. Hübner K.F. and Fry S.A. Eds. Elsevier/North Holland, New York, pp 91-104, 1980

Jammet, 1980b

Jammet H., Gongora R., Pouillard P., Le Gô and Parmentier N.
The 1978 Algerian accident: four cases of protracted whole-body irradiation. In: *The medical basis for radiation accident preparedness*. Hübner K.F. and Fry S.A. Eds. Elsevier/North Holland, New York, pp 113-129, 1980

Jeanblanc, 2006

Jeanblanc A.
Thérapie cellulaire, une grande première. *Le Point*, n° 1750, 30 mars 2006

Krasniouk, 2004

Krasniouk V.I.
Radiation injuries in man after criminal exposure. In: *IRPA 11*, International Congress of the International Radiation Protection Association, Madrid, 23-28 May 2004

Martinez, 1964

Martinez R.G., Cassab G.H., Ganem G.G., Gutman E.K., Lieberman M.L., Vater L.B., Linares M.M. and Rodriguez H.M.
Observations of the accidental exposure of a family to a source of cobalt-60. *Revista Medica Inst Mex Seguro Social*, **3**, supp 1, 14-68, 1964

Mettler, 1990

Mettler F.A. and Allen S.N.
Military radiation accidents. In : *Medical management of radiation accidents*. Mettler F.A., Kelsy C.A. and Ricks R.C. Eds. CRC Press, Boca Raton, 45-88, 1990

Mettler, 2001a

Mettler F.A. Jr., Voelz G.L., Nénot J.C. and Gusev I.A.
Criticality accidents. In: *Medical management of radiation accidents, Second Edition*. I.A. Gusev, A.K. Guskova, F.A. Mettler, Eds. 173-194, CRC Press, Boca Raton, London, New York, Washington DC, 2001

Mettler, 2001b

Mettler F.A. Jr. and Nénot J.C.
Accidental radiation injury from industrial sources. In: *Medical management of radiation accidents, Second Edition*. I.A. Gusev, A.K. Guskova, F.A. Mettler, Eds. 241-258, CRC Press, Boca Raton, London, New York, Washington DC, 2001

Mettler, 2001c

Mettler F.A. Jr., Landberg T., Nénot J.C., Medina-Trejos F., Ching R., Garcia I., Perez-Ulloa V. and Valerio-Hernandez M.

A 2-year follow-up of the radiotherapy accident in Costa Rica. In: *Medical management of radiation accidents, Second Edition*, 299-311, CRC Press, Boca Raton, London, New York, Washington DC, 2001

Nénot, 1994a

Nénot J.-C. Chernobyl : Health Management in Chaos. *IAEA International Conference, « Radiation and Society : comprehending radiation risk »*. Paris, 24-28 October 1994

Nénot, 1994b

Nénot J.C.

L'Oural nucléaire. Bilan de 50 ans d'une gestion désastreuse. *La Revue du Praticien*, Paris, 44, 12, 1649-1654, 1994

Nénot, 1996

Nénot J.C.

The Chernobyl accident: the consequences in perspective. In: *One decade after Chernobyl. Summing up the consequences of the accident*. pp 475-509, IAEA, Vienna, 1996

Nénot, 2001

Nénot J.C., Robeau D.

Le site de Kyshtym. In : *Catastrophes et accidents nucléaires dans l'ex-Union Soviétique*. Collection IPSN, EDP Sciences Ed., 39-58, 2001

Nénot, 2006

Nénot J.C.

Terrorisme et radioprotection. *Revue Générale Nucléaire*. RGN n°3, mai-juin 2006, 74-82, 2006

Newman, 1990

Newman H.F.

The malfunction "54" accelerator accidents 1985, 1986, 1987, 1990. In: *The medical basis for radiation preparedness II. Clinical experience and follow-up since 1979*. Ricks R.C. and Fry S.A. Eds. Elsevier, New York, pp 165-171, 1990

Parmentier, 1990

Parmentier N., Nénot J.C., Parmentier C.

Two cases of accidental protracted overexposure: aspect of an extensive bone marrow study. In: *The medical basis for radiation accident preparedness II. Clinical experience and follow-up since 1979*. Ricks R.C. and Fry S.A., Eds. Elsevier, New York, pp 29-51, 1990

Peter, 2001

Peter R.A., Carsin H., Cosset J.M., Clough C., Gourmelon P., Nénot J.C. Accident involving abandoned sources in Georgia, 1997, In: *Medical management of radiation accidents. Second Edition*. I.A. Gusev, A.K. Guskova, F.A. Mettler, Eds., pp 259-268, CRC Press, Boca Raton, London, New York, Washington DC, 2001

Poïarkov, 2001

Poïarkov V., Robeau D.

L'accident de Tchernobyl. In : *Catastrophes et accidents nucléaires dans l'ex-Union Soviétique*. Collection IPSN, EDP Sciences Ed., 59-99, 2001

Sec. De Energ., 1984

Secretaria de Energia, Minas e Industria Paraestatal

Accidente por contaminacion con cobalt-60, Mexico 1984, *CNSNS-IT-001*, 1984

Stavem, 1995

Stavem P., Brogger A., Devik F., Flatby J., Van Der Hagen C.B., Henriksen T., Hoel P.S., Host H., Kett K. and Petersen B.

Lethal acute gamma radiation accident at Kjeller, Norway, report of a case. *Acta radiologica Oncology*, **24**, Fasc.1, 61-63, 1995

Stannard, 1988

Stannard J.N

Radioactivity and Health. A History. R.W. Baalman, Jr. Ed., *Chap. 4 : Polonium and thorium*, 234-267, Springfield, 1988

Suzuki, 2000

Suzuki G.

RERF dispatches radiation emergency specialists to Thailand at request of IAEA. *RERF Update*, **11**, issue 1, Spring 2000, 4, 2000

Tronko, 1999

Tronko M.D., Bogdanova T.I., Komissarenko I.V., Epstein O.V., Oliynyk V., Kovalenko A, Likhtarev I.A., Kairo I., Peters S.B., Livolsi V.A.

Thyroid carcinoma in children and adolescents in Ukraine. *Cancer*, **86** (1), 1999 July 1, 149-156, 1999

UNSCEAR, 1988

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. *UNSCEAR 1988 Report to the General Assembly, with Annexes*. Effects, Annex G, Appendix: Acute radiation effects in victims of the Chernobyl nuclear power plant accident. United Nations, New York, 2000

UNSCEAR, 2000

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. *UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes*. Vol II: Effects, Annex J: Exposures and effects of the Chernobyl accident. United Nations, New York, 1988.

US NRC, 1993

US Nuclear Regulatory Commission
Loss of an iridium-192 source and therapy misadministration at Indiana regional Cancer Center, Indiana, Pennsylvania, on November 16, 1992, NUREG-1480, 1993.

Vargo, 1999

Vargo G.J.
A brief history of nuclear criticality accidents in Russia -1953-1997. *Health Physics*, November 1999, Vol 77, n°5, 505-511, 1999.

Williams, 1996

Williams E.D.
Effects on the thyroid in populations exposed to radiation as a result of the Chernobyl accident. In: *One decade after Chernobyl. Summing up the consequences of the accident*, pp 207-238 IAEA, Vienna, 1996.

Wojcik, 2004

Wojcik A, Cosset J-M., Clough K. Gourmelon P, Bottolier J-F., Trompier F., Stephan G., Sommer S., Wiczorek A., Sluszniaik J., Kulakowski A., Gozdz S., Michalik J., Stachwicz W., Sadlo J., Bulski W., Izewska J.
The radiological accident at the Bialystok Oncology Centre: cause, dose estimation and patient treatment. *IRPA 11*, International Congress of the International Radiation Protection Association, Madrid, 23-25 May 2004.

Wu de-Chang, 1993

Communication personnelle