

L'accident radiologique de Goiânia



AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE, VIENNE, 1989

La photographie de la couverture a été prise lors des opérations de décontamination qui ont suivi l'accident radiologique de Goiânia. Une ouverture a été pratiquée dans le mur d'une maison à l'aide d'un excavateur pour éliminer un point chaud avant la démolition. Toutes les photographies sont reproduites avec l'aimable autorisation de la Commission nationale de l'énergie nucléaire (CNEN), Rio de Janeiro (Brésil).

L'ACCIDENT RADIOLOGIQUE DE GOIÂNIA

Les Etats ci-après sont Membres de l'Agence internationale de l'énergie atomique:

AFGHANISTAN	HONGRIE	PEROU
AFRIQUE DU SUD	INDE	PHILIPPINES
ALBANIE	INDONESIE	POLOGNE
ALGERIE	IRAN, REPUBLIQUE	PORTUGAL
ALLEMAGNE,	ISLAMIQUE D'	QATAR
REPUBLIQUE FEDERALE D'	IRAQ	REPUBLIQUE ARABE SYRIENNE
ARABIE SAOUDITE	IRLANDE	REPUBLIQUE DEMOCRATIQUE
ARGENTINE	ISLANDE	ALLEMANDE
AUSTRALIE	ISRAEL	REPUBLIQUE DOMINICAINE
AUTRICHE	ITALIE	REPUBLIQUE POPULAIRE
BANGLADESH	JAMAHIRIYA ARABE LIBYENNE	DEMOCRATIQUE DE COREE
BELGIQUE	JAMAÏQUE	REPUBLIQUE SOCIALISTE
BOLIVIE	JAPON	SOVIETIQUE DE BIELORUSSIE
BRESIL	JORDANIE	REPUBLIQUE SOCIALISTE
BULGARIE	KAMPUCHEA DEMOCRATIQUE	SOVIETIQUE D'UKRAINE
CAMEROUN	KENYA	REPUBLIQUE-UNIE DE TANZANIE
CANADA	KOWEÏT	ROUMANIE
CHILI	LIBAN	ROYAUME-UNI DE GRANDE-
CHINE	LIBERIA	BRETAGNE ET D'IRLANDE DU NORD
CHYPRE	LIECHTENSTEIN	SAINT-SIEGE
COLOMBIE	LUXEMBOURG	SENEGAL
COREE, REPUBLIQUE DE	MADAGASCAR	SIERRA LEONE
COSTA RICA	MALAISIE	SINGAPOUR
COTE D'IVOIRE	MALI	SOUDAN
CUBA	MAROC	SRI LANKA
DANEMARK	MAURICE	SUEDE
EGYPTE	MEXIQUE	SUISSE
EL SALVADOR	MONACO	TCHECOSLOVAQUIE
EMIRATS ARABES UNIS	MONGOLIE	THAÏLANDE
EQUATEUR	MYANMAR	TUNISIE
ESPAGNE	NAMIBIE	TURQUIE
ETATS-UNIS D'AMERIQUE	NICARAGUA	UNION DES REPUBLIQUES
ETHIOPIE	NIGER	SOCIALISTES SOVIETIQUES
FINLANDE	NIGERIA	URUGUAY
FRANCE	NORVEGE	VENEZUELA
GABON	NOUVELLE-ZELANDE	VIET NAM
GHANA	OUGANDA	YUGOSLAVIE
GRECE	PAKISTAN	ZAIRE
GUATEMALA	PANAMA	ZAMBIE
HAÏTI	PARAGUAY	ZIMBABWE
	PAYS-BAS	

Le Statut de l'Agence a été approuvé le 23 octobre 1956 par la Conférence sur le Statut de l'AIEA, tenue au Siège de l'Organisation des Nations Unies, à New York; il est entré en vigueur le 29 juillet 1957. L'Agence a son Siège à Vienne. Son principal objectif est «de hâter et d'accroître la contribution de l'énergie atomique à la paix, la santé et la prospérité dans le monde entier».

© AIEA, 1989

Pour obtenir l'autorisation de reproduire ou de traduire des passages de la présente publication, s'adresser par écrit à l'Agence internationale de l'énergie atomique, Wagramerstrasse 5, B.P. 100, A-1400 Vienne, Autriche.

Imprimé par l'AIEA en Autriche
Décembre 1989

L'ACCIDENT RADIOLOGIQUE DE GOIÂNIA

AGENCE INTERNATIONALE DE L'ENERGIE ATOMIQUE
VIENNE, 1989

**LE PRESENT RAPPORT EST EGALEMENT PUBLIE
EN ANGLAIS, EN ESPAGNOL ET EN RUSSE**

**L'ACCIDENT RADIOLOGIQUE DE GOIANIA
AIEA, VIENNE, 1989
STI/PUB/815
ISBN 92-0-229089-X**

AVANT-PROPOS

du Directeur général

Le Gouvernement et les autorités brésiliennes ont dû faire face au tragique accident qu'a provoqué à Goiânia la manipulation irresponsable d'une source de haute activité pour la téléthérapie, qui n'était pas sous surveillance radiologique. Ils ont pris des mesures destinées à renforcer les contrôles à l'avenir. Parallèlement, la Commission nationale de l'énergie nucléaire (CNEN) du Brésil et l'AIEA ont réuni conjointement un groupe de spécialistes de plusieurs pays et l'ont chargé d'examiner les causes et les conséquences de l'accident afin de permettre aux responsables et autorités compétentes d'autres pays de tirer des leçons de l'expérience brésilienne pour réduire les risques d'apparition de tels accidents et se donner les moyens d'y faire face le cas échéant.

Le présent rapport est l'aboutissement de cet examen. Il retrace la genèse de l'accident et explique comment il a été maîtrisé et ses conséquences circonscrites. Enfin, il présente les observations et recommandations auxquelles l'examen a donné lieu.

La réunion d'examen et le présent rapport s'inscrivent logiquement dans le cadre du programme de sûreté de l'AIEA qui vise, entre autres, à procéder, après tout accident radiologique grave, à un examen-évaluation et à en établir un compte rendu détaillé qui puisse être utile à tous les pays.

Les applications de l'énergie atomique et des matières nucléaires dans l'industrie, la médecine, l'agriculture et la recherche scientifique peuvent beaucoup faciliter l'accroissement de la productivité, le diagnostic et le traitement des maladies et le développement de l'agriculture. Ces applications ne sont pas tout à fait exemptes de risques. Toute entreprise humaine comporte un élément de risque, mais s'il renonce à entreprendre, l'homme s'expose à d'autres risques.

Cela dit, le public doit être sûr que les autorités compétentes et les responsables ne négligent rien pour réduire ces risques le plus possible; à cette fin, il faut tirer des enseignements des accidents qui se produisent malgré les précautions prises.

Les accidents radiologiques sont rares. En effet, si l'on considère le nombre de sources radioactives utilisées dans le monde dans les domaines de la médecine, de l'agriculture et de l'industrie, le petit nombre d'accidents témoigne de l'efficacité des règlements et mesures de sûreté.

Toutefois, ce petit nombre d'accidents ne justifie pas que l'on s'endorme sur ses lauriers. Il n'y a pas d'accident radiologique qui soit acceptable et tout accident qui constitue une menace de contamination étendue a toutes les chances d'affoler un public qui n'entretient pas encore des rapports sereins avec la radioactivité.

L'accident de Goiânia est l'un des accidents radiologiques les plus graves qui se soient jamais produits. Il a fait quatre morts, de nombreux blessés par irradiation et a entraîné la contamination de plusieurs quartiers de la ville.

Le rapport sur l'accident donne à penser que les conséquences auraient pu être bien plus graves encore, si ceux qui sont intervenus n'avaient pas accompli leur tâche avec compétence, courage et détermination. Il faut d'abord rendre hommage à ceux qui ont compris la gravité de la situation et ont persuadé les autorités de la nécessité d'agir de toute urgence. Une fois alertées, les autorités — à Goiânia et dans l'Etat de Goiás, au sein des organismes fédéraux du Gouvernement brésilien et ailleurs au Brésil et dans les autres pays — sont intervenues avec diligence et efficacité. La CNEN s'est particulièrement distinguée en coordonnant l'intervention dans l'Etat de Goiás ainsi qu'aux niveaux national et international.

Cet accident a été la première occasion de mettre à l'épreuve la nouvelle Convention sur l'assistance en cas d'accident nucléaire ou de situation d'urgence radiologique en vertu de laquelle l'Agence doit aider à coordonner les interventions des Etats Membres désireux d'offrir des secours.

L'AIEA souhaite rendre hommage à la CNEN qui a adopté dès le départ une attitude positive et constructive, a informé les autres Etats Membres de l'accident de Goiânia et a permis à tous de tirer les enseignements de son expérience.

L'AIEA remercie tout particulièrement la Direction de l'Institut de radio-protection et de dosimétrie (IRD) de l'aide fournie pour organiser la réunion d'examen.

NOTE DE LA REDACTION

Le présent rapport se fonde essentiellement sur des renseignements donnés à l'AIEA par les spécialistes désignés par le Gouvernement brésilien.

Bien que l'exactitude des renseignements qui y figurent ait été vérifiée aussi rigoureusement que possible, l'AIEA et ses Etats Membres déclinent toute responsabilité quant à l'usage qui peut en être fait. La mention de certaines sociétés ou de leurs marques (déposées ou non) n'implique aucune intention de porter atteinte à des droits exclusifs, ni ne doit être interprétée comme une approbation ou une recommandation de la part de l'Agence.

TABLE DES MATIERES

RESUME DU RAPPORT

Première partie. L'accident	1
Partie II. Conséquences pour l'homme: action en faveur de la population concernée	2
Partie III. Contamination de l'environnement: évaluations et actions correctrices	3
Partie IV. Observations et recommandations	6

PREMIERE PARTIE. L'ACCIDENT

1. INTRODUCTION	11
1.1. Objectif du rapport	11
1.2. Plan du rapport	12
2. GENERALITES	13
2.1. Goiânia	13
2.2. Organismes compétents et infrastructure de protection radiologique au Brésil	13
2.3. Cadre réglementaire et autorités compétentes	15
2.4. Dispositifs d'intervention	17
3. DESCRIPTION DE L'ACCIDENT	19
3.1. Installations concernées	19
3.2. L'appareil de téléthérapie et sa source radioactive	19
3.3. Chronologie de l'accident	22
4. PREMIERES ACTIONS ENTREPRISES APRES LA DECOUVERTE DE L'ACCIDENT	31
4.1. Premières actions entreprises par les autorités de Goiânia	31
4.2. Mobilisation initiale des ressources	33
4.3. Equipe d'avant-garde de la CNEN	33
4.4. Antenne médicale de la CNEN	34
4.5. Renforcement de l'intervention	35
4.6. Organisation initiale	35
4.7. Premiers soins dispensés aux accidentés	37
4.8. Transition vers une phase de contrôle à long terme	38

**PARTIE II. CONSEQUENCES POUR L'HOMME: ACTION EN
FAVEUR DE LA POPULATION CONCERNEE**

5.	ACTION MEDICALE	41
5.1.	Introduction	41
5.2.	Phase initiale de l'intervention	42
5.3.	Traitement	44
5.4.	Autopsies	49
6.	DOSIMETRIE	52
6.1.	Dosimétrie interne	52
6.2.	Evaluation des doses par analyse cytogénétique	58
6.3.	Dosimétrie externe	61

**PARTIE III. CONTAMINATION DE L'ENVIRONNEMENT:
EVALUATIONS ET ACTIONS CORRECTRICES**

7.	INTRODUCTION ET EXPOSE DES ACTIONS ENTREPRISES	65
7.1.	Introduction	65
7.2.	Aperçu	66
7.3.	Critères de dose pour l'action	70
8.	EVALUATIONS	74
8.1.	Dispersion de la contamination	74
8.2.	Levés radiologiques	74
8.3.	Surveillance de l'environnement	79
8.4.	Appareils de mesures radiologiques	83
9.	DECONTAMINATION	84
10.	STOCKAGE DES DECHETS	86
10.1.	Choix du site de stockage des déchets	86
10.2.	Classification et contrôle	86
10.3.	Emballage	88
10.4.	Conception du site de stockage provisoire	88
10.5.	Transport des déchets jusqu'au site de stockage	89
10.6.	Inventaire	90
10.7.	Suivi	90

PARTIE IV. OBSERVATIONS ET RECOMMANDATIONS	93
---	-----------

PHOTOGRAPHIES	99
 APPENDICES ET ANNEXES	
Appendice I: COOPERATION INTERNATIONALE	117
Appendice II: INFORMATION DU PUBLIC	121
Appendice III: L'ACCIDENT DE GOIÂNIA DANS SON CONTEXTE ...	123
Appendice IV: CONCLUSIONS DE LA CNEN	126
Annexe I: MATERIEL DE CONTROLE RADIOLOGIQUE	129
Annexe II: RECOMMANDATIONS POUR LE RENVOI DES PATIENTS CHEZ EUX	132
Annexe III: PROTECTION RADIOLOGIQUE	136
Annexe IV: DECONTAMINATION CHIMIQUE	141
BIBLIOGRAPHIE	147
LISTE DES PARTICIPANTS	153

RESUME DU RAPPORT

PREMIERE PARTIE. L'ACCIDENT

On sait maintenant que, vers la fin de 1985, une clinique de radiothérapie de Goiânia (Brésil) — l'Instituto Goiano de Radioterapia — a emménagé dans de nouveaux locaux, emportant avec elle un appareil de téléthérapie au cobalt 60 et laissant sur place un appareil au césium 137 sans en aviser l'organisme réglementaire, comme elle était tenue de le faire. Les locaux abandonnés ont ensuite été partiellement démolis, de sorte que l'appareil au césium 137 est resté sans aucune protection. Deux individus ont pénétré dans ces locaux désaffectés; ignorant ce qu'était l'appareil, ils ont pensé qu'il pourrait être vendu comme ferraille, ont enlevé le barillet porte-source de la tête d'irradiation, l'ont emporté chez eux et ont essayé de le démonter.

Ce faisant, ils ont brisé l'enveloppe de la source radioactive proprement dite, laquelle était de la poudre de chlorure de césium très soluble qui pouvait donc se disperser aisément. L'environnement en a été contaminé: plusieurs personnes ont subi une irradiation externe et une contamination interne. C'est ainsi qu'a débuté un des plus graves accidents radiologiques qui se soient jamais produits.

Après la rupture de l'enveloppe, les restes du barillet porte-source ont été vendus à un ferrailleur qui remarqua que, dans l'obscurité, l'objet luisait d'une lumière bleutée. Pendant un certain temps, des amis et des membres de sa famille vinrent lui rendre visite pour contempler ce phénomène insolite. De petits fragments de ce qui avait été la source, de la taille d'un grain de riz, furent distribués à plusieurs familles. Ce petit jeu dura cinq jours, mais chez plusieurs personnes apparurent bientôt des troubles gastro-intestinaux dus évidemment à leur exposition aux rayonnements.

Au début, ces troubles n'ont pas été attribués à une irradiation, mais une des personnes irradiées a quand même fait le rapprochement entre ses malaises et la source; elle en a donc porté les restes au service de santé publique de la ville, déclenchant ainsi le processus qui aboutit à la découverte de l'accident.

Un physicien de Goiânia fut le premier à mesurer l'ampleur de la contamination radioactive; de sa propre initiative, il décida de faire évacuer deux zones. Simultanément, les autorités, qui avaient été alertées, ont décidé de mettre immédiatement en œuvre tout un arsenal de moyens. Plusieurs autres sites contaminés ont été repérés et rapidement évacués.

PARTIE II. CONSEQUENCES POUR L'HOMME: ACTION EN FAVEUR DE LA POPULATION CONCERNEE

Dès que l'on sut qu'il s'agissait d'un accident grave, des spécialistes, notamment des physiciens et des médecins, ont été envoyés à Goiânia depuis Rio de Janeiro et São Paulo. Une fois sur place, ils se sont rendus au stade où pouvaient se faire identifier les blessés et les porteurs d'une contamination. Le dépistage a eu lieu et 20 personnes ont été envoyées à l'hôpital.

Quatorze d'entre elles furent par la suite transférées à l'hôpital naval Marcilio Dias, à Rio de Janeiro. Les six autres ont été soignées à l'hôpital général de Goiânia où l'on avait installé un anthroporadiamètre dont on s'est servi pour compléter les analyses biochimiques et mesurer les effets de la préparation au bleu de Prusse administrée aux patients dans les deux hôpitaux en vue de faciliter l'élimination du césium. Des analyses cytogénétiques ont permis de distinguer entre les personnes gravement atteintes et les cas bénins qui n'exigeaient pas un traitement intensif.

La décontamination de l'épiderme des patients ainsi que l'élimination de la peau desquamée provenant des radiolésions et celle des excréments contaminés ont posé de sérieux problèmes. Les examens hématologiques et médicaux quotidiens, la qualité des soins et les analyses biochimiques de cultures de sang ont contribué à la détection rapide et au traitement des infections systémiques localisées.

Quatre des blessés sont décédés après quatre semaines d'hospitalisation. L'autopsie a révélé des hémorragies et des complications septiques associées au syndrome d'irradiation aiguë. Les meilleures évaluations indépendantes de la dose absorbée chez ces quatre victimes, obtenues par analyse cytogénétique, se situaient entre 4,5 et plus de 6 grays (Gy). Deux patients ayant reçu des doses analogues ont survécu. Un nouveau médicament du genre hormone, le facteur de stimulation des colonies de granulocytes microphages, a été utilisé pour traiter les personnes surexposées, mais les résultats n'ont pas été concluants. En l'espace de deux mois, tous les survivants en traitement à Rio de Janeiro furent renvoyés à l'hôpital général de Goiânia où l'on a continué le traitement d'élimination du césium jusqu'à ce que l'on puisse les renvoyer chez eux sans risque.

En tout, quelque 112 000 personnes ont été examinées, dont 249 ont été trouvées porteuses d'une contamination interne ou externe. Certains sujets avaient subi une très forte contamination interne ou externe selon la manière dont ils avaient manipulé le chlorure de césium, par exemple en se saupoudrant la peau et en mangeant avec les mains contaminées, ou en raison d'un transfert de la radioactivité déposée sur les bâtiments, le mobilier, les appareils ou les ustensiles.

Plus de 110 échantillons de sang prélevés sur des personnes touchées par l'accident ont été analysés par des méthodes cytogénétiques. On a déterminé la fréquence des aberrations chromosomiques chez des lymphocytes de culture, et la dose absorbée a été évaluée à l'aide de courbes d'étalonnage in vitro. Les valeurs s'échelonnaient de zéro à 7 Gy. L'étude statistique des cellules présentant des aberra-

tions chromosomiques (distribution de Poisson) a permis de conclure que plusieurs patients avaient subi une irradiation non uniforme. Chez certaines personnes fortement exposées on continue de rechercher les lymphocytes porteurs d'aberrations cytogénétiques.

Des échantillons d'urines ont été pris chez des individus dont on pouvait supposer qu'ils avaient subi une contamination interne, et leur analyse a facilité le dépistage. De même, des échantillons d'urines et de selles ont été prélevés tous les jours chez les porteurs d'une contamination interne. Les quantités absorbées et les doses engagées ont été évaluées à l'aide de modèles mathématiques tenant compte de l'âge. L'efficacité du bleu de Prusse comme agent d'élimination du césium a été évaluée à partir des quantités relatives de césium présentes dans les selles et dans l'urine. L'anthroporadiamètre installé à Goiânia a permis d'apprécier les effets de différentes doses de cet agent sur la période biologique du césium dans l'organisme.

PARTIE III. CONTAMINATION DE L'ENVIRONNEMENT: EVALUATIONS ET ACTIONS CORRECTRICES

L'environnement a beaucoup souffert de l'accident. La décontamination s'est faite en deux temps: il a fallu d'abord agir de toute urgence pour maîtriser toutes les sources potentielles de contamination, ce qui était fait pour l'essentiel dès le 3 octobre, mais n'a été réellement terminé que vers Noël 1987; à cette date, le cas de tous les principaux sites contaminés était réglé. Il a fallu ensuite remettre les choses en état et rétablir des conditions de vie normales, opération qui a duré jusqu'en mars 1988.

Les principaux objectifs de l'intervention d'urgence étaient d'éviter les fortes doses individuelles pouvant avoir des effets non stochastiques, de repérer les principaux sites contaminés et d'établir une surveillance sur ces sites. Dans un premier temps, il s'agissait de tout faire pour maîtriser toutes les sources d'exposition, opération qui a duré trois jours.

Les premiers levés radiologiques ont été faits à pied dans les zones contaminées. Sept foyers principaux ont été repérés, notamment le dépôt de ferraille déjà mentionné; dans certains d'entre eux, les débits de dose atteignaient $2 \text{ Sv} \cdot \text{h}^{-1}$ à un mètre.

Un levé aérien par hélicoptère spécialement équipé a permis de s'assurer qu'aucune zone fortement contaminée n'avait échappé à la détection. En deux jours, toute l'agglomération urbaine de Goiânia — plus de 67 km^2 — a été passée au crible. L'étendue des sept principaux foyers connus a été confirmée et on n'a découvert qu'une seule zone peu étendue qui avait échappé aux contrôles précédents, où l'on a relevé un débit de dose de quelque $21 \text{ mSv} \cdot \text{h}^{-1}$ à un mètre.

Comme il était possible que certaines zones moins contaminées fussent passées inaperçues, notamment au voisinage des zones fortement contaminées entourant les

principaux foyers, un levé radiologique complémentaire intéressant de plus larges périmètres, bien que limité aux voies publiques, a été effectué. Ce levé a été fait au moyen de détecteurs montés à bord de véhicules automobiles, ce qui a permis de parcourir 80 % de la voirie de Goiânia, soit plus de 2000 km. Les principaux foyers de contamination étaient les dépôts de ferraille et les habitations où la source avait été ouverte et ses fragments manipulés; ils se répartissaient sur environ 1 km².

Dans un premier temps, des niveaux de référence ont été fixés pour le contrôle des accès (10 $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$); pour l'évacuation et l'interdiction de zone (2,5 $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ et ultérieurement 10 $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ pour les maisons d'habitation, et 150 $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ pour les zones non occupées); pour les membres des équipes d'intervention (limites de dose et débits de dose correspondants, par jour, par semaine et par mois). Au total, 85 maisons avaient subi une contamination significative et 200 personnes ont été évacuées de 41 d'entre elles. Deux semaines plus tard, 30 maisons étaient rendues à leurs occupants. Il faut préciser que ces niveaux, qui correspondaient grosso modo aux valeurs les plus faibles des niveaux qu'aient recommandées la Commission internationale de protection radiologique et l'AIEA (niveaux de référence ne donnant pas lieu à une intervention), étaient très restrictifs à cause des pressions politiques et sociales qui s'exerçaient.

Par la suite, la dispersion de la contamination dans toute la région et dans le bassin hydrographique a été étudiée. A Goiânia même, un laboratoire a été installé pour mesurer les concentrations de césium dans les sols et les eaux souterraines, les sédiments et les eaux courantes, l'eau potable, l'air et les denrées alimentaires. Des dispositions ont dû être prises, uniquement en ce qui concerne le sol et les fruits, dans un rayon de 50 mètres autour des principaux foyers.

La suite de l'intervention, qui consistait essentiellement à remettre les choses en état, s'est heurtée à diverses difficultés lorsqu'il s'est agi de surveiller la zone urbaine et le bassin hydrographique. La tâche était d'autant plus difficile que de fortes pluies s'étaient abattues sur la région entre le 21 et le 28 septembre, favorisant encore la dispersion du césium dans l'environnement. La radioactivité, au lieu d'être emportée par les eaux comme prévu, s'est déposée sur les toits, et ce dépôt a été la cause principale des débits de dose mesurés dans les habitations.

La contamination de l'eau potable était extrêmement faible et les eaux souterraines en étaient exemptes, à l'exception de quelques puits aux alentours des principaux foyers de contamination, où les concentrations de césium dépassaient tout juste le seuil de détection.

L'essentiel de l'action correctrice entreprise a consisté à décontaminer les principaux sites contaminés (notamment les abords des principaux foyers), les maisons d'habitation, les lieux publics, les véhicules, etc. Pour les principaux foyers, il a fallu mobiliser du gros matériel capable d'enlever de grandes masses de terre et de démolir des maisons. Il a aussi fallu confectionner de nombreux récipients de divers types pour recueillir les déchets, chercher un site de stockage provisoire et l'aménager. Ce problème fut réglé dès la mi-novembre, et l'on a commencé aussitôt

à décontaminer les foyers principaux et les autres zones, opération qui s'est prolongée jusqu'à la fin de décembre 1987.

Les niveaux d'investigation retenus pour l'examen des actions à entreprendre correspondaient à une dose de 5 mSv pendant la première année et à une dose anticipée de 1 mSv par an par la suite. Il a fallu démolir sept maisons et évacuer les gravats et de la terre. La terre enlevée a été remplacée par du béton ou du sol frais compacté. Dans les lieux peu contaminés, la principale source d'exposition était le dépôt de poussière radioactive sur le sol; en cas de nécessité, après enlèvement de la couche superficielle, là encore on recouvrait de terre fraîche. Sur les 159 maisons examinées, 42 ont dû être décontaminées à l'aspirateur à l'intérieur et par lavage au jet à l'extérieur. Diverses méthodes de décontamination chimique se sont avérées très utiles, chacune étant adaptée à la situation, aux matériaux à décontaminer et au niveau de radioactivité.

Les niveaux de référence qui ont motivé ces actions correctrices ont été fixés sous une forte pression des milieux politiques et de l'opinion publique. Leurs valeurs sont sensiblement inférieures à celles qu'aurait données l'application du principe d'optimisation. On pourrait même dire que, dans la plupart des cas, elles s'appliquaient à une situation normale et non à une phase de remise en état après un accident.

Après les fêtes de Noël de 1987, les zones à moindre débit de dose entourant les principaux foyers ont été décontaminées. Ce travail n'a pas exigé l'emploi de matériel lourd, et des procédures d'optimisation ont été mises au point et appliquées. L'opération a duré jusqu'en mars 1988.

L'intervention a produit dès le début de grandes quantités de déchets radioactifs. Un site de stockage provisoire a été choisi à 20 km de Goiânia. Les déchets ont été classés en trois catégories: non radioactifs (en dessous de $74 \text{ kBq} \cdot \text{kg}^{-1}$), de basse activité (en dessous de $2 \text{ mSv} \cdot \text{h}^{-1}$) et d'activité moyenne (entre 2 et $20 \text{ mSv} \cdot \text{h}^{-1}$). Divers types d'emballage ont été utilisés, selon les niveaux de contamination: 3800 fûts métalliques de 200 litres, 1400 caisses métalliques de 5 tonnes, 10 conteneurs de transport de 32 m^3 et 6 conteneurs spéciaux en béton. Le dépôt provisoire était prévu pour 4000 à 5000 m^3 de déchets, soit environ 12 500 fûts et 1470 caisses.

En fait, le volume total a atteint 3500 m^3 , soit plus de 275 chargements de camion, quantité considérable qui résultait essentiellement des niveaux de référence fixés pour la décontamination, tant au cours de la période d'urgence que pendant celle du retour à la normale. Les dépenses dues à l'application de ces niveaux, surtout pendant la deuxième période, sont loin d'être négligeables.

Un système d'échantillonnage a été mis en place pour surveiller le ruissellement, notamment dû aux fortes pluies, à partir de la plate-forme sur laquelle ont été déposés les déchets. La meilleure estimation de la radioactivité retrouvée dans la contamination est de quelque 44 TBq (1200 Ci), alors que la radioactivité connue de la source était, avant l'accident, de 50,9 TBq (1375 Ci). On n'a pas encore décidé où les déchets seraient définitivement stockés.

PARTIE IV. OBSERVATIONS ET RECOMMANDATIONS

Bien souvent, l'examen d'un accident radiologique ne met en évidence que ce que l'on sait déjà. Nombreuses sont les observations et les recommandations qui ont été faites à l'issue de l'examen de l'accident de Goiânia. Cela dit, celles qui sont exposées ici ne s'inspirent pas nécessairement des conditions particulières de cet accident.

En l'occurrence, l'une des principales conclusions est que rien ne peut atténuer les obligations de la personne désignée comme responsable de la sûreté de la source, dans l'éventualité d'un accident de cette nature. L'enlèvement d'une source radioactive de l'endroit spécifié lors de la notification, de l'enregistrement et de l'autorisation peut constituer un risque majeur. Pour prévenir une telle négligence, la personne responsable devrait donc adopter les dispositions nécessaires, notamment des procédures de vérification et des mesures de protection physique. S'il est vrai que le système de contrôle a pour objet de s'assurer que le nécessaire est fait par les cadres et les exécutants, il ne peut ni ne doit d'aucune façon dégager la direction de l'établissement de sa responsabilité.

Pour que la tâche du responsable de la source soit facilitée, il faudrait que les moyens de se conformer aux prescriptions réglementaires soient spécifiques, simples et que leur emploi puisse être imposé. En outre, la communication entre tous ceux qui interviennent dans l'application des prescriptions de radioprotection et son contrôle doit être bien assurée.

L'information du grand public sur les dangers que peuvent présenter les sources de rayonnements peut grandement contribuer à réduire la probabilité des accidents radiologiques. Il faudrait envisager un système de marquage signalant les risques d'irradiation d'une façon aisément compréhensible par le grand public.

Les propriétés physiques et chimiques des sources radioactives ont une grande influence sur la nature des accidents, et il conviendrait d'en tenir compte dans les conditions des autorisations délivrées aux fabricants de ces sources, car elles déterminent les effets que peuvent avoir les sources accidentées ou détournées de leur emploi.

Malgré toutes les précautions, un accident peut toujours survenir et comporter un risque radiologique, de sorte qu'il faudrait disposer d'un réseau de transmissions et d'une structure de commandement connus de tous les intéressés. A cet égard, il y a lieu de mentionner que les plans d'intervention en cas d'urgence radiologique devraient s'appliquer non seulement aux accidents nucléaires, mais aussi à toute la gamme des accidents possibles comportant un risque de radioexposition.

Sur le plan médical, l'expérience acquise à Goiânia confirme dans l'ensemble que les techniques de diagnostic actuelles ainsi que les antibiotiques administrés et les méthodes de séparation des plaquettes et de transfusion sont satisfaisants. En outre, la preuve a été faite de l'utilité des méthodes cytogénétiques pour estimer les

doses et de la remarquable efficacité du bleu de Prusse pour l'élimination de la contamination interne par le césium 137.

Les traitements de victimes des accidents radiologiques sont extrêmement variés et complexes. Les patients doivent être hospitalisés et confiés à un personnel constamment occupé aux traitements hématologique, chimiothérapeutique, radiothérapeutique et chirurgical de malades menacés de cancer, d'immuno-dépression et de dyscrasie. En général, le personnel et les services médicaux ne sont pas prêts à répondre à des urgences radiologiques ou à traiter des cas de radiolésion. Les plans d'intervention devraient donc prévoir qu'un personnel médical spécialement formé donnera les premiers soins à ces patients. Cela dit, le diagnostic des radiolésions ne peut se faire que si le personnel non nucléaire possède les connaissances requises et si sont disponibles des médecins spécialement formés, ce qui suppose des programmes éducatifs largement diffusés.

Quant à la contamination de l'environnement due à un accident nucléaire, il ne faut pas négliger le problème de la décision concernant les niveaux de référence pour la décontamination. On a toujours tendance à imposer des critères extrêmement restrictifs, qui répondent la plupart du temps à des considérations d'ordre politique et social. Leur application implique en fait un gros effort sur le plan économique et social, en plus des frais occasionnés par l'accident proprement dit, qui ne se justifie pas dans tous les cas.

Enfin, il ne faut pas oublier de faire, dès que possible après l'accident, un compte rendu des faits dont le souvenir a tendance à s'estomper avec le temps. Il importe en particulier d'informer les médias, le public et, bien entendu, les équipes d'intervention. Plus spécialement, ces dernières devraient recevoir une aide en matière d'administration et d'information qui soit proportionnelle à la gravité de l'accident. Dans les cas les plus sérieux, cette aide doit être fournie sur place dans les meilleurs délais. Tous ceux qui peuvent être appelés à faire partie d'une équipe d'intervention en cas d'urgence radiologique devraient recevoir une formation théorique et pratique adaptée aux fonctions qui seraient les leurs.

Première partie

L'ACCIDENT

1. INTRODUCTION

2. GENERALITES

3. DESCRIPTION DE L'ACCIDENT

4. PREMIERES ACTIONS ENTREPRISES APRES LA DECOUVERTE
DE L'ACCIDENT

1. INTRODUCTION

Le 13 septembre 1987, une source scellée de haute activité au césium 137 (50,9 TBq ou 1375 Ci, à l'époque) était enlevée de son logement de protection dans un appareil de téléthérapie abandonné dans une clinique désaffectée de Goiânia (Brésil) et était par la suite brisée. De nombreuses personnes ont reçu de fortes doses de rayonnements par irradiation externe et contamination interne. Quatre sont décédées, et 28 ont subi des brûlures par irradiation. Des habitations et des lieux publics ont été contaminés. La décontamination a nécessité la démolition de sept maisons et de divers autres bâtiments ainsi que l'enlèvement de la couche superficielle du sol sur de vastes zones. Au total, quelque 3500 m³ de déchets radioactifs ont été accumulés.

L'accident de Goiânia est l'un des plus graves accidents radiologiques qui se soient jamais produits. Il est cependant à rapprocher de plusieurs autres accidents survenus à Mexico (1962), en Algérie (1978), au Maroc (1983) et à Ciudad Juárez (Mexique, 1983). Ce dernier accident présente d'ailleurs de frappantes analogies avec celui de Goiânia.

Les renseignements facilement accessibles sur ces accidents étant plus ou moins fragmentaires, une documentation utile a été perdue. Pour éviter que cela ne se reproduise et appeler l'attention de tous sur la nécessité de faire une plus large place à la radioprotection en dehors de l'industrie nucléaire, l'AIEA a collaboré avec les autorités brésiliennes pour procéder à un examen de l'accident de Goiânia.

1.1. OBJECTIF DU RAPPORT

Les objectifs de l'examen ont été les suivants:

- a) établir, à partir des faits, un rapport cohérent sur l'accident;
- b) en tirer des enseignements pour réduire la probabilité d'apparition de tels accidents et y faire face s'il s'en produit;
- c) obtenir tous les renseignements possibles sur les effets médicaux des radio-expositions et sur les soins à donner aux personnes gravement irradiées et contaminées;
- d) tirer des leçons sur la manière de maîtriser les accidents entraînant une contamination étendue;
- e) évaluer l'efficacité de la coopération internationale en matière d'interventions d'urgence et déterminer les améliorations qui peuvent être apportées.

1.2. PLAN DU RAPPORT

Un examen du type de celui qui est présenté ici doit nécessairement tendre à donner une vision neutre et objective du déroulement de l'accident et de l'intervention subséquente. C'est dans cette perspective que le rapport est divisé en cinq grandes parties:

- Description et analyse de l'accident: enlèvement et rupture de la source, découverte de l'accident et phase initiale de l'intervention.

- Conséquences pour l'homme: action en faveur de la population concernée. Administration, traitement et soin des blessés, et dosimétrie de la contamination interne et de l'irradiation externe.

- Evaluation de la contamination de l'environnement et actions correctives.

- Observations et recommandations: enseignements à tirer.

- Appendices et annexes donnant d'autres détails et informations administratives, scientifiques et techniques sur l'accident.

Le présent rapport devrait aider les autorités compétentes à formuler des orientations en vue de limiter les risques d'accidents radiologiques et leurs conséquences, et à établir des plans d'intervention. En ce qui concerne ce dernier point, il faudrait se rappeler qu'il est facile de formuler dans un bureau, une fois l'alerte passée, des plans d'intervention qui auraient permis de faire face au «dernier» accident. Chaque accident est en fait un cas d'espèce qui exige l'adaptation et la modification du plan-cadre. En outre, les accidents sont à l'origine de traumatismes et de tensions nerveuses dont seuls peut-être ceux qui en ont directement fait l'expérience peuvent avoir conscience.

2. GENERALITES

2.1. GOIÂNIA

Goiânia, capitale de l'Etat de Goiás, se situe sur le plateau central du Brésil, réputé pour ses fermes céréalières et ses élevages de bovins. La température moyenne annuelle y est de 21,9°C (avec des pointes fréquentes à 40°C), et le climat est humide avec une pluviométrie annuelle de 1700 mm.

Goiânia est une grande ville qui compte un million d'habitants environ. L'accident s'est produit dans l'un des quartiers les plus pauvres de la ville, où le niveau d'instruction est faible. La figure 1 permet de se faire une idée de l'étendue relative de la superficie contaminée, et de la position géographique de Goiânia par rapport à Rio de Janeiro (1348 km) et São Paulo (919 km), où se trouvent les principaux services de protection radiologique.

On trouvera ci-après une brève description des établissements et organismes de la Fédération, de l'Etat et de la Ville qui sont intervenus. Le Ministère fédéral de la santé, qui s'occupe des questions sanitaires au plan national, délègue une partie de ses responsabilités aux Secrétaires à la santé des Etats. Les questions relatives à l'environnement sont traitées au niveau de Goiás par un organisme appelé SEMAGO. Goiânia même dispose d'un service de santé publique, la Vigilância Sanitária, responsable notamment des questions touchant aux produits alimentaires et pharmaceutiques.

2.2. ORGANISMES COMPETENTS ET INFRASTRUCTURE DE PROTECTION RADIOLOGIQUE AU BRESIL

L'autorité nationale compétente en matière d'énergie nucléaire au Brésil est la Commission nationale de l'énergie nucléaire (CNEN), dont le Président relève directement du Président de la République. La CNEN a trois instituts de recherche: l'Institut de recherche nucléaire et énergétique (IPEN), à São Paulo, l'Institut de radioprotection et de dosimétrie (IRD) et l'Institut de génie nucléaire (IEN) qui se trouvent, avec le siège de la CNEN, à Rio de Janeiro (voir la figure 2).

L'IPEN dispose d'un réacteur de recherche et produit l'essentiel des radioéléments à usage médical et des sources à usage industriel du Brésil. Il possède également des usines de traitement du thorium et de l'uranium. Son département de radioprotection assure les services dont l'Institut a besoin, ainsi que certaines fonctions extérieures d'inspection réglementaire dans le sud du pays. L'IEN dispose, lui aussi, d'un réacteur de recherche et des services connexes de radioprotection, mais s'occupe principalement d'instrumentation et de génie nucléaire.

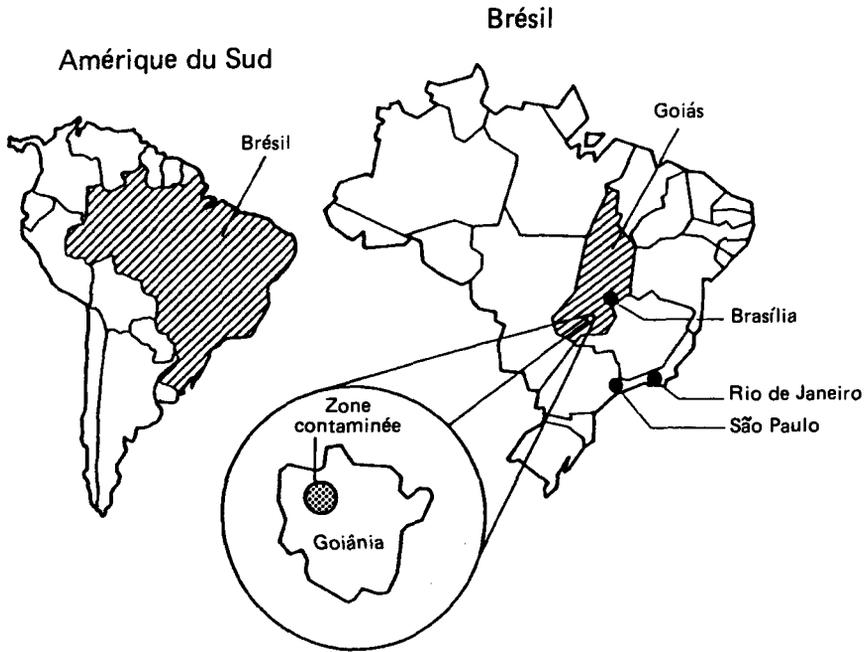


FIG. 1. Cartes et plan indiquant la situation géographique de Goiânia par rapport à Rio de Janeiro (1348 km) et São Paulo (919 km), où se trouvent les principaux services de radioprotection, ainsi que l'étendue relative de la zone contaminée.

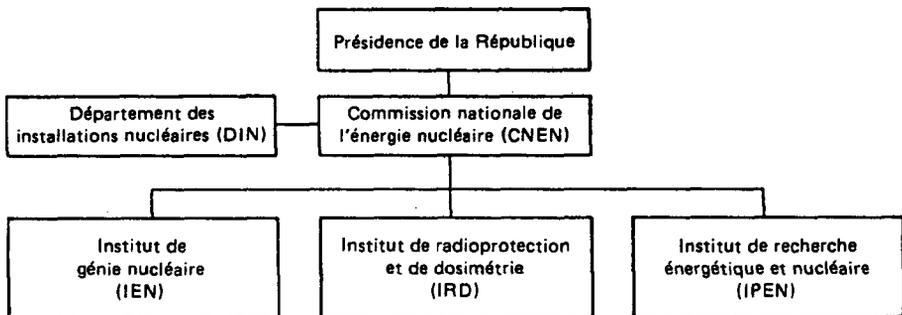


FIG. 2. Les trois instituts de recherche et le département chargé de la réglementation de la Commission nationale de l'énergie nucléaire du Brésil (CNEN).

L'IRD étant le principal organisme de radioprotection du Brésil, c'est lui qui a fourni l'essentiel du personnel et des moyens nécessaires pour faire face à l'accident. Il compte plusieurs départements, qui sont notamment:

- a) le Département de radioprotection environnementale, qui s'occupe des enquêtes d'impact, du contrôle des effluents, de radiochimie et de recherche;
- b) le Département de surveillance radiologique individuelle, qui assure des services aussi bien externes qu'internes de surveillance individuelle; dans le cadre des services internes, des groupes travaillent sur l'évaluation des doses, la modélisation, le biodosage, l'anthroporadiamétrie et la dosimétrie par analyse cytogénétique;
- c) le Département de radioprotection professionnelle, qui exécute un programme d'inspection, de surveillance radiologique et de formation pour les applications médicales et industrielles et pour le cycle du combustible nucléaire;
- d) le Département de métrologie, qui a un laboratoire secondaire d'étalonnage pour la dosimétrie et est le service national d'étalonnage des appareils;
- e) le Département de la formation et de l'éducation, qui organise des cours de formation à la radioprotection à différents niveaux.

Outre la CNEN, plusieurs autres organismes fédéraux sont à mentionner. Empresas Nucleares Brasileiras SA (NUCLEBRAS) est chargée des activités liées au cycle du combustible nucléaire, aux composants de réacteurs, à la recherche et à la commercialisation des matières nucléaires. NUCLEBRAS dispose, à Goiânia, d'un bureau qui supervise les opérations de prospection d'uranium de la société dans le centre du pays. Ce bureau a fourni une partie des appareils utilisés lors de la phase initiale de l'intervention par les autorités locales. La production d'électricité d'origine nucléaire relève de la société FURNAS, qui exploite la centrale nucléaire d'Angra. Le Plan d'intervention de la centrale prévoit le transport de toute personne irradiée à l'hôpital naval Marcilio Dias de Rio de Janeiro, où elle sera soignée dans un service spécialisé.

2.3. CADRE REGLEMENTAIRE ET AUTORITES COMPETENTES

La CNEN est l'organisme réglementaire qui délivre les autorisations d'achat et de transport des sources radioactives (loi 6189 du 16 décembre 1974). Elle est aussi chargée de réglementer la production, l'utilisation, la sûreté et l'élimination des matières radioactives dans leurs différents domaines d'application. S'agissant des utilisations médicales, la CNEN et les Secrétaires à la santé du Gouvernement fédéral et des Etats se partagent les responsabilités en matière de réglementation de la manière suivante:

La CNEN met en œuvre un système d'autorisation applicable aussi bien aux personnes qu'aux installations. Les techniciens ou responsables de la radioprotection doivent suivre des cours de radioprotection et passer des examens, qui sont définis en fonction du type de l'installation. Cette formation est sanctionnée par un certificat

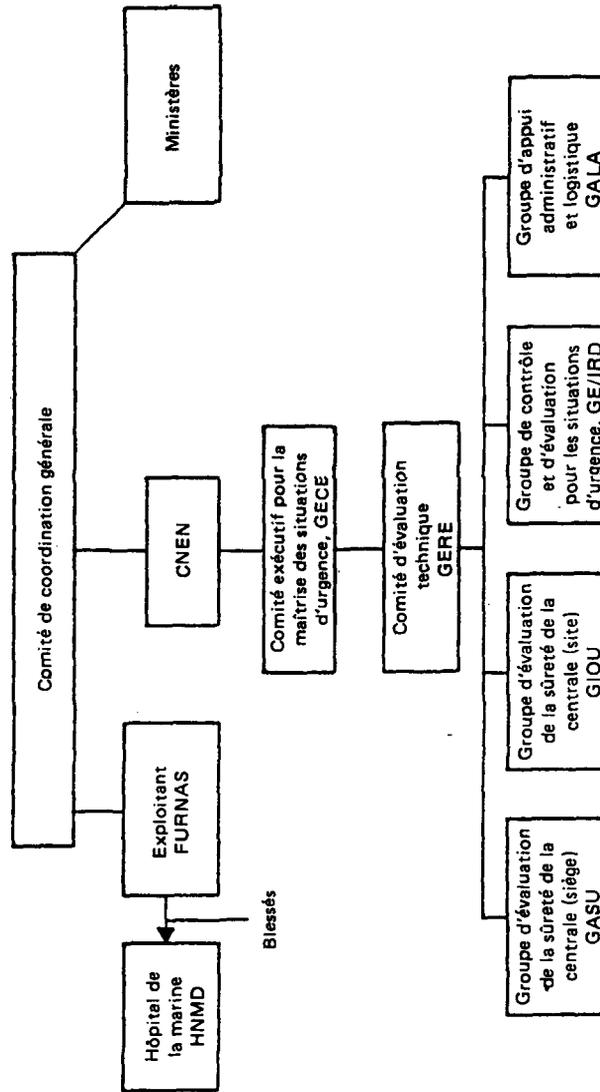


FIG. 3. Organigramme de la fonction intervention pour la centrale nucléaire d'Angra.

d'aptitude. Un établissement ne peut obtenir l'autorisation d'utiliser des sources radioactives que s'il a à son service un personnel ayant obtenu les certificats d'aptitude voulus.

Pour la construction d'une nouvelle installation, la CNEN exige que les plans lui soient soumis avant le début des travaux, ainsi qu'une documentation complète concernant la sûreté radiologique, c'est-à-dire notamment les procédures, les règlements locaux, l'appareillage et la surveillance individuelle, et surtout les plans d'intervention en cas d'urgence. Cette documentation est examinée et, une fois l'installation construite, une inspection de mise en service a lieu pour vérifier la conformité des dispositions. C'est à ce stade seulement qu'une autorisation est délivrée pour l'exploitation de l'installation. L'octroi de ces autorisations est assujéti à un certain nombre de conditions, dont la principale est que la CNEN doit être informée de toute modification de l'organisation matérielle, par exemple si l'on souhaite déplacer des sources ou s'en débarrasser. Le Règlement 6/73 de la CNEN précise les conditions que les utilisateurs sont légalement tenus de respecter une fois que l'autorisation a été délivrée.

Par la suite, l'inspection des installations médicales en application de ce règlement relève du Ministère fédéral de la santé, en vertu de la loi 6229 du 17 juillet 1975. Cette fonction a, en fait, été déléguée aux Secrétaires à la santé des Etats aux termes du décret 77052 du 19 janvier 1976, mais elle est exercée diversement selon les Etats.

2.4. DISPOSITIFS D'INTERVENTION

Les moyens existant dans le cadre de la CNEN au moment de l'accident avaient été conçus pour faire face à des accidents de deux catégories principales. Le Plan d'intervention en cas d'urgence pour la centrale nucléaire d'Angra était destiné à maîtriser un éventuel accident dans la centrale; en outre, d'autres dispositions devaient permettre de faire face à des accidents radiologiques dans le secteur non nucléo-électrique, qui sont en général très circonscrits et peuvent être, par exemple, des accidents de transport ou des accidents de sources pour la radiographie. L'accident de Goiânia n'entraîne dans aucune de ces catégories, de sorte que des éléments empruntés à l'un et l'autre des dispositifs d'intervention ont été adoptés. Les caractéristiques principales des deux dispositifs sont décrites ci-après.

On trouvera à la figure 3 un organigramme de la fonction intervention pour la centrale nucléaire d'Angra. Les sigles correspondent aux noms brésiliens, les titres français étant une description et non une traduction littérale. Au niveau politique, les décisions importantes sont prises par le Comité de coordination générale où sont représentés les principaux organismes gouvernementaux tels que la CNEN, FURNAS et les ministères de la Fédération et des Etats. Les rapports de la CNEN sont établis par le Comité exécutif pour la maîtrise des situations d'urgence (GECE)

sur avis du Comité d'évaluation technique (GERE). Deux des groupes relevant du GERE et chargés de l'évaluation de la sûreté de la centrale au siège (GASU) et sur le site (GIOU) s'occupent de la sûreté de la centrale d'Angra et n'étaient pas directement concernés par l'accident de Goiânia.

En cas d'urgence, le Groupe de contrôle et d'évaluation pour les situations d'urgence (GE/IRD) est entièrement responsable du contrôle radiologique de l'environnement et de la population en dehors du site ainsi que de l'évaluation des résultats. Enfin, il y a aussi le Groupe d'appui administratif et logistique (GALA). Ces groupes étaient tous deux, dans une certaine mesure, concernés par l'accident de Goiânia. L'IRD comporte un groupe spécial composé des coordonnateurs désignés de différentes équipes de surveillance et d'appui. Bien que ces dispositifs n'aient pas été conçus pour une situation d'urgence du type de celle de Goiânia, la préparation et la planification qu'ils avaient exigées ont incontestablement été utiles. Ainsi, l'existence d'une salle de commande complétée d'un réseau de transmissions, pour la maîtrise des situations d'urgence, a été précieuse.

Le dispositif en place pour les accidents radiologiques dans le secteur non nucléo-électrique prévoit qu'il y ait en permanence quelqu'un que l'on puisse contacter pour obtenir une assistance le cas échéant. Cette personne, également appelée coordonnateur pour les situations d'urgence nucléaire (NEC), était, dans le cadre du Plan d'intervention, le Directeur du Département des installations nucléaires (DIN) de la CNEN, basé à Rio de Janeiro. Selon le lieu de l'accident, le coordonnateur se met en rapport avec le Directeur de l'IPEN à São Paulo ou avec celui de l'IRD à Rio de Janeiro. Chacun de ces organismes a désigné des coordonnateurs pour les situations d'urgence (différents de ceux du Plan d'intervention de la centrale nucléaire d'Angra), qui sont chargés d'envoyer rapidement sur le lieu de l'accident une personne compétente, avec des appareils de mesure, pour maîtriser elle-même la situation ou déterminer les moyens supplémentaires qui pourraient être nécessaires.

3. DESCRIPTION DE L'ACCIDENT

3.1. INSTALLATIONS CONCERNEES

L'Instituto Goiano de Radioterapia (IGR) était une clinique privée appartenant à des médecins associés. Ses installations consistaient notamment en salles de téléthérapie au césium 137 et au cobalt 60. L'IGR avait suivi la procédure normale d'autorisation décrite en 2.3, et, le 17 juin 1971, la CNEN avait approuvé l'importation de la source au césium 137. Peu de temps après, le matériel était installé, inspecté et entrainé en service. Aux termes de l'autorisation d'exploitation délivrée par la CNEN, un physicien et un médecin (l'un des associés) étaient conjointement responsables de faire respecter les conditions de l'autorisation. Il était en particulier précisé que toute modification importante des conditions d'utilisation du matériel ou des installations devait être signalée à la CNEN.

On sait maintenant que, vers la fin de 1985, l'IGR a quitté les locaux qu'il occupait, et qu'une nouvelle association a emménagé dans d'autres locaux. L'appareil de téléthérapie au cobalt 60 a été transporté dans les nouveaux locaux. La propriété de l'équipement de l'IGR ayant fait l'objet d'un différend, l'appareil de téléthérapie au césium 137 a été laissé sur place. La CNEN n'a pas reçu notification de ces modifications, comme l'exigeaient les conditions de l'autorisation. La plus grande partie de la clinique et certains des immeubles voisins ont été démolis. Les salles de thérapie n'ont pas été démolies, mais sont tombées en ruines et semblent avoir servi d'abri à des vagabonds. (Voir les photographies 1 à 3.)

Les circonstances dans lesquelles l'appareil de téléthérapie complet avec sa source au césium 137 a été abandonné dans les anciens locaux, mis en péril et finalement brisé n'ont pas été totalement élucidées. A l'époque de la rédaction du présent rapport, elles faisaient l'objet d'une action en justice. Il n'en reste pas moins que la responsabilité professionnelle et morale de la sûreté d'une source radioactive incombe aux personnes qui en ont été investies selon les conditions de l'autorisation.

3.2. L'APPAREIL DE TELETHERAPIE ET SA SOURCE RADIOACTIVE

L'appareil de radiotéléthérapie dont il est question était un Cesapan F-3000 conçu par Barazetti et Cie, de Milan (Italie), dans les années 50, et commercialisé par Generay SpA (Italie). On trouvera à la figure 4 un croquis représentant ce type d'appareil. Pour comprendre ce qui s'est passé par la suite, une description des principaux éléments de l'appareil est nécessaire.

L'enveloppe scellée de la source radioactive est placée dans un *disque porte-source* en plomb et acier inoxydable, qui fait fonction d'*obturateur rotatif* (voir la figure 5). Si l'on veut produire un faisceau de rayonnement, une rotation du disque

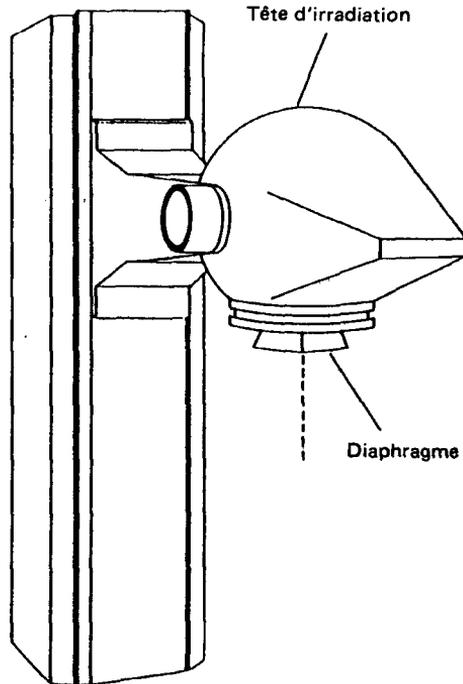


FIG. 4. Schéma d'un appareil de téléthérapie analogue à celui dont le barillet a été enlevé à Goiânia. La tête d'irradiation est réglable verticalement et tourne sur deux axes horizontaux.

par moteur électrique permet d'aligner la source et le diaphragme. Après l'exposition ou dans le cas d'une panne de courant, un rappel mécanique automatique fait revenir le disque de la position d'irradiation à la position de stockage. Le disque est séparé du mécanisme d'entraînement électrique par un *cylindre de protection*. Tous ces éléments forment le *barillet*. L'appareil a été conçu de manière à ce que le barillet puisse être retiré, au moyen d'outils spéciaux, de la protection que constitue la *tête d'irradiation*.

Le numéro de série de la source radioactive scellée n'est pas connu, mais il semble, d'après certaines informations, qu'elle ait été fabriquée au Laboratoire national d'Oak Ridge (ORNL) des Etats-Unis, vers 1970. Il s'agissait de césium 137, sous forme de poudre de chlorure de césium, très soluble, qui avait été compactée de manière à former un bloc homogène renfermé dans une double enveloppe en acier inoxydable (voir la figure 6). Le tout était enfermé dans une *enveloppe aux normes internationales*, ayant les dimensions communes à la plupart des appareils de radiothérapie. La figure 6 donne une vue en coupe d'une source scellée dans une enveloppe aux normes internationales.

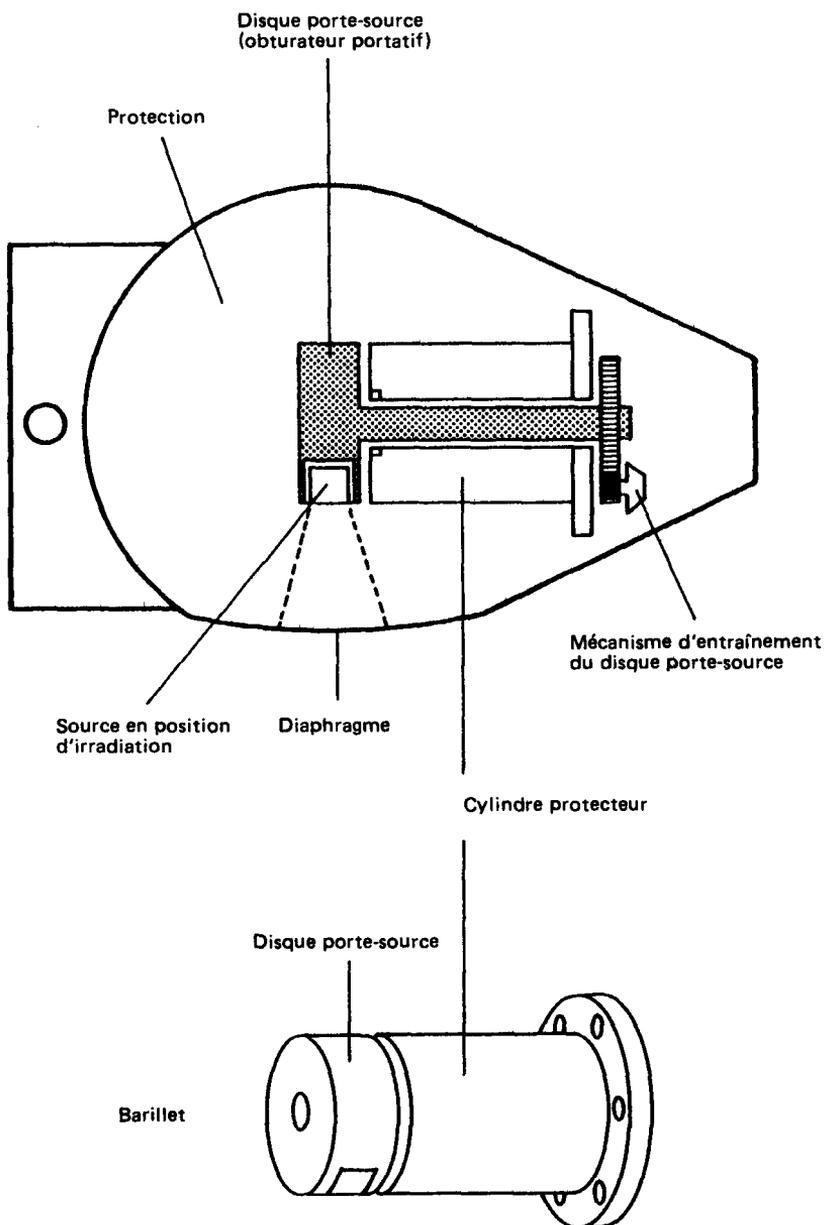


FIG. 5. Diagramme en coupe de la tête d'irradiation d'un appareil de téléthérapie analogue à celui de Goiânia, montrant le barillet contenant la source.

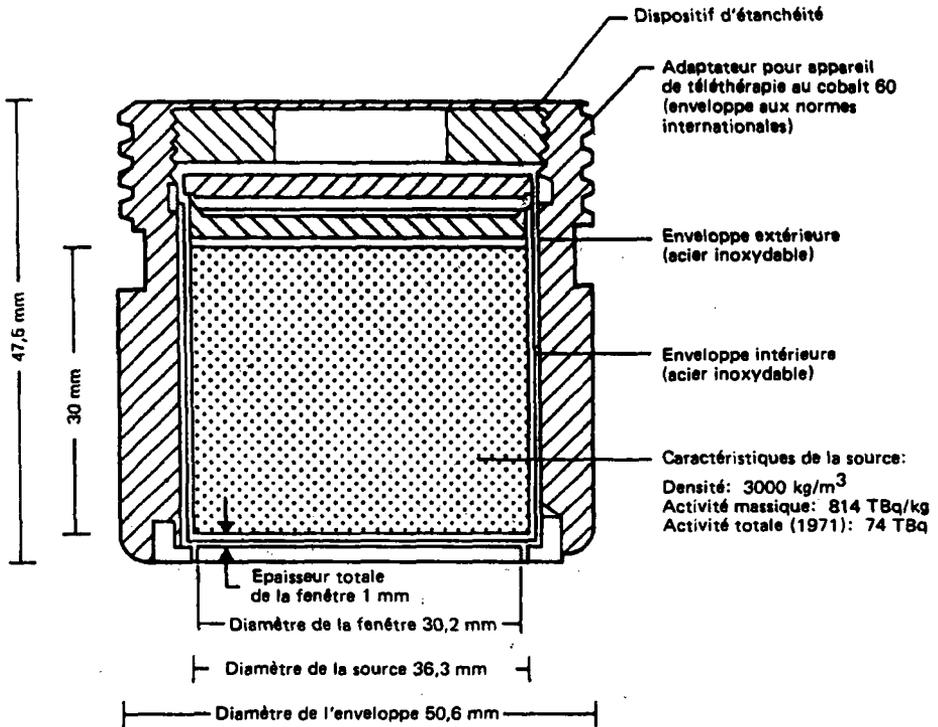


FIG. 6. Coupe d'une enveloppe aux normes internationales. C'est une enveloppe de ce type, contenant du chlorure de césium radioactif, qui a été ouverte dans l'accident de Goiânia. La source avait été compactée en un bloc homogène et enfermée dans une double enveloppe en acier inoxydable.

On trouvera au tableau I les caractéristiques du césium 137 et de la source en question, ainsi que des indications intéressant la radioprotection.

3.3. CHRONOLOGIE DE L'ACCIDENT

Plusieurs personnes ont été interrogées sur les événements qui ont précédé l'accident de Goiânia. Les versions concordent, à quelques différences près qui ont trait essentiellement aux descriptions des éléments de l'appareil de téléthérapie. La reconstitution des faits exposée au tableau II, où les intéressés ne sont désignés que par leurs initiales, semble être la plus plausible. De nombreuses personnes et plusieurs lieux situés dans le quartier de l'Aeroporto de Goiânia sont mentionnés. Afin d'aider le lecteur à comprendre ce qui s'est passé, trois figures hors-texte (7 à 9: voir au recto de la dernière page de couverture) ont été ajoutées à la fin du présent rapport pour compléter la description du tableau II.

TABLEAU I. CARACTERISTIQUES DU CESIUM 137

Caractéristiques du césium 137

Rayons gamma		0,66 MeV (84%)
Rayonnement bêta	Energies maximales	0,51 MeV (95%)
		1,17 MeV (5%)
	Energie moyenne	0,187 MeV
Période		30 ans
Constante de débit d'exposition		$8,9 \times 10^{-2}$ mGy·h ⁻¹ à 1 m par GBq
		(0,33 rad·h ⁻¹ à 1 m par Ci)

Caractéristiques de la source au césium de l'IGR (septembre 1987)

Radioactivité	50,9 TBq (1 375 Ci)
Débit de dose à 1 m	4,56 Gy·h ⁻¹ (456 rad·h ⁻¹)

Matière radioactive

Volume	$3,1 \times 10^{-5}$ m ³
Masse	0,093 kg
Activité massique	0,55 TBq·g ⁻¹ (15,1 Ci·g ⁻¹)

Valeurs intéressant la radioprotection

Débit de dose à 1 m dû à une contamination du sol uniforme	$1,6 \times 10^{-12}$ Sv·h ⁻¹ (Bq·m ⁻²) ⁻¹
Dose par unité incorporée (ingestion)	$1,2 \times 10^{-8}$ Sv·Bq ⁻¹
Dose par unité incorporée (inhalation)	$8,7 \times 10^{-9}$ Sv·Bq ⁻¹
Limite annuelle d'incorporation (orale)	$4,0 \times 10^6$ Bq
Limite annuelle d'incorporation (inhalation)	$6,0 \times 10^6$ Bq
Limite dérivée de concentration dans l'air	$2,0 \times 10^3$ Bq·m ⁻³

La figure 7 est un plan de Goiânia indiquant les principaux sites contaminés. La figure 8 donne, sous forme schématique, la chronologie de l'accident; elle s'inspire d'un dessin tracé peu après l'accident par les enquêteurs pour tenter d'établir les faits. La figure 9 est un tableau où les personnes les plus gravement contaminées dans l'accident de Goiânia sont classées en fonction du lieu de l'exposition et des liens familiaux. On y trouve également une estimation (établie à partir de l'analyse cytogénétique) des doses reçues, ainsi que l'indication des personnes hospitalisées et des quatre personnes décédées.

(Suite du texte page 29).

TABLEAU II. CHRONOLOGIE DE L'ACCIDENT DE GOIANIA

10-13 sept. 1987 R.A. entend dire que du matériel de valeur a été abandonné dans la clinique désaffectée de l'IGR (site A). R.A. et un ami, W.P., se rendent sur les lieux et tentent de démonter l'appareil de téléthérapie avec des outils rudimentaires. R.A. et W.P. réussissent finalement à enlever le barillet. La boîte brillante en acier inoxydable leur semble précieuse et ils l'emportent chez R.A. dans une brouette (site B), à 500 m de là.

Aucune trace de contamination n'ayant été décelée à la clinique, le barillet était vraisemblablement encore intact à ce stade. Cependant, à partir du moment où R.A. et W.P. ont enlevé le barillet, ils ont pu se trouver exposés directement au rayonnement, comme s'ils avaient placé le disque porte-source sur la position d'irradiation lorsque celui-ci était encore dans la tête d'irradiation. Le débit de dose de la source était de $4,6 \text{ Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ à 1 m.

13 sept. W.P. et R.A. ont des vomissements qu'ils attribuent à ce qu'ils ont mangé.

14 sept. W.P. a la diarrhée et des vertiges et l'une de ses mains est enflée (œdème).

Ses brûlures à la main et au poignet, apparues plus tard, donnent à penser qu'il a saisi le barillet avec la main à l'endroit du diaphragme.

15 sept. W.P. consulte un médecin qui attribue les symptômes observés à un type de réaction allergique dû à l'absorption d'aliments de mauvaise qualité. Sur l'avis du médecin, W.P. reste chez lui pendant une semaine; son état est médiocre et il n'accomplit que des tâches demandant peu d'effort.

18 sept. Le barillet avait été déposé sur le sol sous un manguier dans le jardin de R.A. qui s'employait de temps à autre à séparer du barillet le disque porte-source. Lors de l'une de ces tentatives, il perce avec un tournevis la fenêtre de 1 mm d'épaisseur de l'enveloppe et en extrait une substance qu'il pense être de la poudre à tirer et à laquelle il essaie de mettre le feu. Le 18 septembre, il parvient à séparer le disque porte-source.

Lorsqu'elle a été mesurée le 2 octobre, la contamination résiduelle sous le manguier donnait un débit de dose de $1,1 \text{ Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ à 1 m. La maison et le terrain de R.A. étaient fortement contaminés. La maison a dû être démolie et la couche superficielle du sol enlevée.

TABLEAU II. CHRONOLOGIE (suite)

18 sept. Les fragments du barillet sont vendus à D.F., un ferrailleur qui habite à proximité de son magasin (dépôt de ferraille I, site C). Ils sont transportés dans une brouette (par un employé de D.F.). Le soir de ce jour, D.F. va dans le garage où ils ont été entreposés et remarque que l'enveloppe de la source émet une lueur bleue. Trouvant que l'effet est joli et pensant que la poudre a peut-être de la valeur (comme une pierre précieuse) ou un pouvoir magique, il emporte l'enveloppe chez lui. Au cours des trois jours qui suivent, des voisins, parents et connaissances sont invités à venir voir cet objet insolite. Durant cette période, D.F. et sa femme M.F.1 examinent la poudre de près.

M.F.1 (dose de 5,7 Gy) ne survivra pas. D.F. (dose de 7,0 Gy) survivra, peut-être parce qu'il a passé plus de temps en dehors de la maison et que l'exposition a été fractionnée.

21 sept. E.F.1, un ami de D.F., lui rend visite et à l'aide d'un tournevis, retire de l'enveloppe des fragments de la source. Ces fragments, qui ont approximativement la taille d'un grain de riz, se réduisent facilement en poudre. E.F.1 donne quelques fragments colorés à son frère E.F.2 et emporte le reste chez lui. D.F. en distribue également à sa famille. Plusieurs personnes s'enduisent la peau de cette poudre radioactive qui ressemble à la substance scintillante utilisée au carnaval.

21-23 sept. M.F.1 a des vomissements et la diarrhée. Elle est examinée à l'Hôpital São Lucas. Le diagnostic est le même que pour W.P. (réaction allergique à des aliments qu'elle a absorbés) et on la renvoie se reposer chez elle. Sa mère, M.A.1, vient passer deux jours pour la soigner, puis rentre chez elle à quelque distance de Goiânia, porteuse d'une contamination non négligeable.

Dans le cas de M.A.1, on a estimé la quantité incorporée initialement à 10 MBq (270 mCi) et, sur la base de l'analyse cytogénétique, on a estimé la dose à 4,3 Gy. Bien que l'état de M.A.1 fût critique à un certain moment, elle a survécu.

22-24 sept. Les fragments du barillet sont manipulés par les employés de D.F., en particulier I.S. et A.S., qui tentent d'en séparer le plomb. A un certain moment, Z.S. leur rend visite et offre de revenir les aider avec un chalumeau, mais il oublie de le faire.

TABLEAU II. CHRONOLOGIE (suite)

- I.S. et A.S. ont reçu des doses de 4,5 et 5,3 Gy respectivement, auxquelles ils ne survivront pas. Ils ont probablement subi une irradiation aiguë lorsqu'ils travaillaient sur les fragments de barillet non protégés.*
- 23 sept. W.P. entre à l'Hôpital Santa Maria où il reste jusqu'au 27 septembre; les effets cutanés dus à la radioexposition sont diagnostiqués comme étant le symptôme d'une maladie et il est transféré à l'Hôpital des maladies tropicales.
- 24 sept. I.F., le frère de D.F., se rend au dépôt de ferraille I où on lui donne des fragments de la source. Il les apporte chez lui, à proximité d'un dépôt de ferraille (dépôt de ferraille II, site D). Les fragments sont placés sur la table pendant le repas. La fille d'I.F., L.F.2, qui a six ans, manie ces fragments pendant le repas, comme le fait le reste de la famille mais moins longtemps.
- L.F.2 décèdera par la suite, ayant, selon les estimations, incorporé 1,0 GBq (27 mCi) et reçu une dose de 6,0 Gy.*
- 25 sept. D.F. vend le plomb et ce qui reste du barillet au propriétaire du dépôt de ferraille III (site E).
- 26 sept. K.S., qui travaille au dépôt de ferraille II, retourne avec une autre personne à l'ancienne clinique et emporte le reste du matériel, en particulier le conteneur de protection (qui pèse quelque 300 kg), au dépôt de ferraille II.
- 28 sept. Plusieurs personnes sont maintenant malades. M.F.1 est convaincue que la poudre brillante retirée du barillet est à l'origine de la maladie. Elle se rend avec G.S., autre employé de D.F., au dépôt de ferraille III et lui fait mettre les restes du barillet et du disque porte-source dans un sac. Ils prennent un autobus et portent le sac à la Vigilância Sanitária (site F). G.S. porte le sac sur l'épaule. Le sac est mis sur le bureau du docteur P.M. et M.F.1 lui dit que son contenu est en train «de faire mourir sa famille».
- G.S. a subi une brûlure assez importante à l'épaule, une dose à l'organisme entier estimée à 3,0 Gy et a incorporé une quantité estimée à 100 MBq (2,7 mCi).*
- 28 sept. Le docteur P.M. laisse tout d'abord le sac sur son bureau, puis s'en inquiète, l'emporte dans une cour et le pose sur une chaise contre le mur d'enceinte extérieur (le sac y reste un jour).
-

TABLEAU II. CHRONOLOGIE (suite)

Le docteur P.M. a reçu une dose estimée à 1,3 Gy. La quantité incorporée était négligeable (les fragments de la source étant restés dans le sac).

M.F.1 et G.S. sont envoyés dans un dispensaire où un premier diagnostic établit qu'ils ont contracté une maladie tropicale. Ils sont donc envoyés à l'Hôpital pour les maladies tropicales. Plusieurs autres personnes contaminées au cours de l'incident et accusant des symptômes similaires s'y trouvent déjà et le même diagnostic a été établi. Cependant, l'un des médecins, le docteur R.P., commence à soupçonner que les lésions cutanées observées chez les patients sont dues à une irradiation. En conséquence, il contacte le docteur A.M., qui travaille à l'Hôpital pour les maladies tropicales et dirige en outre le Centre de documentation toxicologique. Celui-ci a déjà été appelé par le docteur P.M., de la Vigilância Sanitária, au sujet d'un colis suspect (le sac contenant les restes de la source) qu'il pensait initialement contenir des fragments d'un appareil à rayons X. Après avoir soumis les patients à un nouvel examen, les docteurs R.P. et P.M. estiment que la question mérite d'être approfondie. Ils se mettent en rapport avec le docteur J.P., du Département de l'environnement de l'Etat de Goiás. Ce dernier propose de faire examiner le colis suspect par un physicien. Le docteur J.P. en connaît un, W.F., qui se trouve justement en visite à Goiânia; toutefois, il ne parvient à le joindre que le lendemain matin.

Les événements se sont alors précipités, la gravité de l'accident commençant à être saisie; les heures indiquées sont donc approximatives.

29 sept.
8 h

On parvient à joindre par téléphone W.F., le spécialiste agréé que connaît le docteur J.P., et on lui demande s'il pourrait faire des mesures autour d'un colis suspect à la Vigilância Sanitária. W.F. sait où il peut emprunter un débitmètre et accepte. NUCLEBRAS, un organisme gouvernemental s'occupant du cycle du combustible nucléaire, a, à Goiânia, une agence spécialisée dans la prospection de l'uranium. W.F. s'y rend et demande à emprunter un débitmètre. Après quelque temps, on lui prête un scintillomètre (débitmètre équipé d'un détecteur à scintillation très sensible au rayonnement). Cet appareil, habituellement utilisé pour des mesures géologiques, a un temps de réponse rapide et un intervalle de mesure compris entre 0,2 et 30 $\mu\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$. W.F. se dirige donc vers la Vigilância Sanitária et, à

TABLEAU II. CHRONOLOGIE (suite)

- quelque distance de là, met en marche l'appareil qui immédiatement indique la valeur la plus élevée, quelle que soit la direction vers laquelle il est orienté. W.F. suppose que l'appareil est défectueux et revient à l'agence pour en avoir un autre.
- 10 h 20 W.F. arrive à la Vigilância Sanitária. En sortant de l'agence de NUCLEBRAS, il a mis en marche le deuxième débitmètre et il est déjà certain qu'une puissante source de rayonnement se trouve à proximité. Dans l'intervalle, le docteur P.M. s'est tellement inquiété qu'il a appelé les pompiers. W.F. a juste le temps de les empêcher d'emporter la source pour la jeter dans un cours d'eau.
- 11 h W.F. persuade les occupants de la Vigilância Sanitária d'évacuer les lieux. Policiers et pompiers veillent à ce que personne ne pénètre dans le bâtiment.
- 12 h Le docteur P.M. indique la provenance de la source et il se rend, avec W.F., au dépôt de ferraille I. Là, ils constatent que l'appareil indique, sur une vaste zone, une valeur supérieure au maximum, ce qui prouve qu'il y a contamination et que la contamination est étendue. Ils persuadent non sans mal D.F., du dépôt de ferraille I, d'évacuer la zone avec sa famille et de nombreux voisins.
- 13 h W.F. et d'autres personnes se rendent chez le Secrétaire à la santé de l'Etat de Goiás pour informer les autorités de l'incident et de sa gravité et demander des secours. Les responsables font d'abord preuve d'un scepticisme compréhensible devant le récit de l'incident et l'ampleur des opérations d'évacuation envisagées. Il faut quelque temps pour les convaincre que l'importance de l'incident justifie l'intervention du Secrétaire à la santé. W.F. et d'autres ayant insisté, ils sont admis auprès du Secrétaire d'Etat qu'ils mettent au courant de la gravité de la situation.
- 15 h Le Directeur du Département des installations nucléaires de la CNEN est joint par téléphone en tant que coordonnateur désigné pour les situations d'urgence nucléaire. Il suggère de demander le concours du physicien hospitalier de l'IGR, qui dispose d'un appareillage plus complet, de manière à définir plus précisément la nature de l'incident et l'étendue de la zone touchée. Le coordonnateur se met aussi en rapport avec le physicien agréé et le médecin de l'IGR et on commence à soupçonner que la source pourrait provenir de l'IGR.
-

TABLEAU II. CHRONOLOGIE (suite)

16 h-20 h	<p>Plusieurs actions sont entreprises plus ou moins simultanément à Goiânia, notamment:</p> <ul style="list-style-type: none">a) les responsables de l'Hôpital pour les maladies tropicales sont informés que des personnes ont été contaminées et subissent les effets d'une irradiation;b) les différents corps de la protection civile (police, pompiers, ambulances, hôpitaux) sont alertés;c) les sites contaminés connus, c'est-à-dire la Vigilância Sanitária et le dépôt de ferraille I, font l'objet de nouveaux levés radiométriques avec les appareils de l'IGR;d) le Secrétaire à la santé de l'Etat de Goiás convoque une réunion et fait préparer l'accueil des personnes contaminées au stade olympique de la ville (site H). La presse commence à s'intéresser aux événements.
22 h	<p>Z.S. (qui avait offert de découper le barillet au chalumeau) va trouver W.F. et lui explique comment le porte-source a été brisé et où les fragments ont été transportés, ce qui permet à l'équipe de contrôle radiologique de repérer de nouveaux sites fortement contaminés et d'évacuer d'autres personnes. Dans la nuit du 29 au 30 septembre, on recense au stade 22 personnes susceptibles d'avoir été gravement irradiées. Elles sont placées dans des tentes séparées. La séparation se fait en fonction des valeurs de la contamination et des symptômes médicaux, mais aussi d'après l'appartenance à une famille résidant sur tel ou tel site fortement contaminé. Un premier tri est fait par le docteur A.M. et l'un de ses collègues et les personnes qui présentent des lésions sont envoyées à l'hôpital pour les maladies tropicales où se trouvent déjà d'autres patients. La direction de l'hôpital a entre-temps été avertie que les patients étaient contaminés et devaient être isolés.</p>

Il est à noter que l'intérêt qu'a suscité la lueur bleuâtre émanant du chlorure de césium radioactif a sensiblement influé sur le cours des événements. Par ailleurs, la forte solubilité du chlorure de césium a favorisé une contamination étendue de personnes, de biens et de l'environnement. Malgré cela, l'accident aurait pu se terminer de la même manière que l'accident de cobalt 60 qui s'est produit à Ciudad Juárez (Mexique) en 1983, s'est soldé par une contamination limitée et n'a entraîné aucune perte de vies humaines.

Début 1988, à Oak Ridge, des membres du personnel de l'ORNL et du Radiation Emergency Assistance Center/Training Site (REAC/TS) du Département de l'énergie des Etats-Unis ont observé le phénomène de la lueur bleuâtre alors qu'ils retiraient de son enveloppe une source au chlorure de césium 137. On pense qu'il s'agit là d'une fluorescence ou d'un rayonnement de Tcherenkov dû à l'absorption d'humidité par la source. Des études plus approfondies sur la nature de ce phénomène sont en cours à Oak Ridge.

4. PREMIERES ACTIONS ENTREPRISES APRES LA DECOUVERTE DE L'ACCIDENT

On a découvert l'accident dans l'après-midi du 28 septembre et commencé à se rendre compte de sa gravité dans la matinée du 29 septembre. Avant d'examiner la phase initiale d'intervention au cours de laquelle les autorités locales se sont saisies du problème, il convient de faire quelques remarques sur certaines particularités de la séquence d'événements. (On trouvera d'autres remarques générales dans la partie Observations et recommandations.)

4.1. PREMIERES ACTIONS ENTREPRISES PAR LES AUTORITES DE GOIÂNIA

On décrit ci-après l'intervention initiale des autorités de Goiânia, la notification à la CNEN et la mobilisation de cet organisme, ainsi que les premières actions entreprises par l'équipe d'avant-garde et les équipes de médecins et de physiciens de la CNEN à leur arrivée à Goiânia. On indique ensuite comment les premiers secours ont été renforcés et organisés en vue de mettre en œuvre la stratégie de retour à la normale. Cette phase s'est déroulée du mardi 29 septembre au samedi 3 octobre.

Les autorités de Goiânia ont mobilisé la police, les pompiers et les agents de la protection civile, et, le 29 septembre à 20 heures, ont décidé d'affecter le stade olympique voisin à l'isolement des patients et au dépistage de la contamination chez d'autres. Les deux principales zones contaminées connues, la Vigilância Sanitária et le dépôt de ferraille I, ont fait l'objet d'un deuxième contrôle radiologique au moyen des appareils de la nouvelle clinique de l'IGR; les habitants des environs ont été évacués et l'accès interdit. Les personnes susceptibles d'avoir été contaminées ont été recensées et dirigées vers le stade.

Dans la nuit du 29 au 30 septembre, la nouvelle de l'accident s'est ébruitée. L'effet s'est exacerbé le matin suivant, lorsque, au réveil, les gens ont constaté que certaines rues du quartier avaient été barrées sans explication plausible. Beaucoup essayaient de parvenir au stade olympique afin d'y être rassurés, ce qui représentait une lourde charge pour les rares spécialistes munis d'appareils de mesure qui étaient alors disponibles. (Voir les photographies 4 et 5.)

Il n'y avait pas de plan local d'intervention en cas d'urgence radiologique de cette ampleur, mais la stratégie improvisée par les autorités leur a permis de maîtriser la situation et d'empêcher que d'autres personnes ne soient gravement irradiées. Lorsque du personnel de la CNEN fut sur place, les autorités locales ont réorienté leur action dans le sens d'un appui en lui fournissant installations, matériel et soutien administratif, ainsi que les ressources locales nécessaires pour les premières opérations de suivi. Les autorités locales ont été efficaces, car elles ont laissé aux autorités

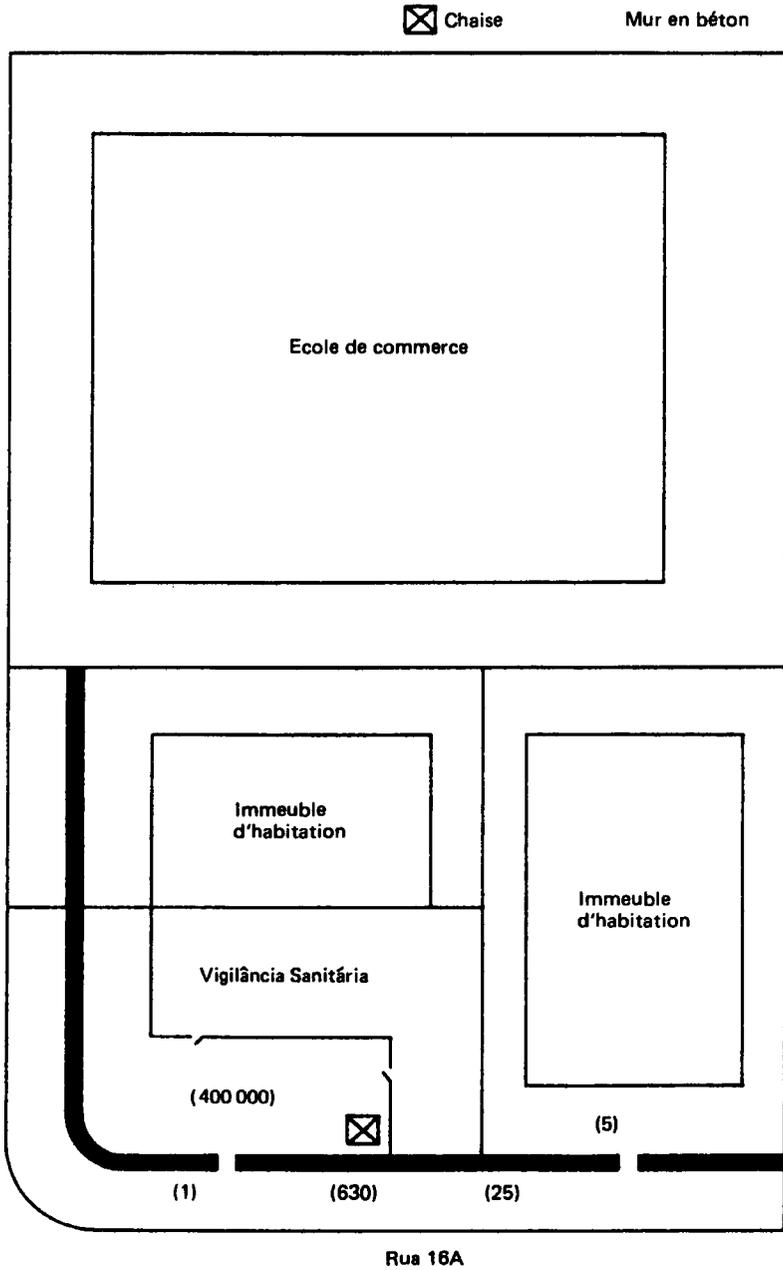


FIG. 10. Le débit de dose (en $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$) aux alentours de la Vigilância Sanitária, Rua 16A.

de la CNEN une situation qu'il leur était plus facile de gérer en vue du retour à la normale.

4.2. MOBILISATION INITIALE DES RESSOURCES

Le dispositif d'intervention a été mis en place par l'intermédiaire du Comité exécutif pour la maîtrise des situations d'urgence (GECE) de la CNEN. Avec l'autorisation du Président par intérim, le Directeur exécutif responsable de la sûreté a mis en activité le Groupe d'intervention du Département des installations nucléaires (GEDIN). Le Directeur du GEDIN a été nommé coordonnateur pour Goiânia, et a fait tout ce qu'il fallait pour mettre en œuvre le Plan d'intervention en cas d'urgence.

Le Directeur de l'Institut de protection radiologique et de dosimétrie (IRD) a été chargé de recenser les besoins au fur et à mesure et de mobiliser les ressources techniques et matérielles de l'IRD pour y faire face. En premier lieu, il s'est agi de joindre des médecins spécialistes et des spécialistes de la radioprotection. Par la suite, du personnel supplémentaire a été nécessaire, ainsi qu'une grande quantité de matériaux et de matériel. Les mécanismes perfectionnés d'appui administratif et logistique prévus dans le Plan d'intervention d'Angra ont été utiles à cet égard.

4.3. EQUIPE D'AVANT-GARDE DE LA CNEN

Le 29 septembre à 18 heures, le coordonnateur pour les situations d'urgence nucléaire (NEC) a quitté Rio de Janeiro pour Goiânia, où il est arrivé le mercredi 30 septembre à 0 h 30. Il a été rejoint en cours de route par deux techniciens de l'IPEN de São Paulo, qui apportaient des appareils de mesure choisis d'après les renseignements préliminaires fournis par W.F.

L'équipe d'avant-garde est d'abord allée dans les locaux en ruines de l'IGR. N'ayant constaté ni signe de radioactivité ni trace de contamination, elle s'est alors rendue à la Vigilância Sanitária et par la suite sur les autres lieux particulièrement contaminés. Elle a constaté que les restes de la source se trouvaient bien dans un sac posé sur une chaise dans l'avant-cour. La figure 10 indique les débits de dose ambiants mesurés auprès des locaux de la Vigilância Sanitária. En particulier, le débit de dose à 1 m des restes de la source était de $0,4 \text{ Sv} \cdot \text{h}^{-1}$, ce qui correspond à une radioactivité d'environ $4,5 \text{ TBq}$ (120 Ci), soit moins de 10% de la radioactivité de la source.

Pendant le reste de la nuit, le physicien qui avait découvert ce qui s'était passé, W.F., a montré à l'équipe de la CNEN les endroits qui, selon lui, étaient les principaux sites contaminés. W.F. et les autorités de Goiânia ont décidé de faire évacuer les zones où le débit de dose dépassait $2,5 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$. Compte tenu de l'urgence de la situation, il ne pouvait être question d'avoir recours à une théorie compliquée pour

formuler un critère d'intervention. La première approximation était simplement fondée sur la limite annuelle pour l'irradiation professionnelle recommandée au plan international, qui est de 50 mSv par an. W.F. savait que pour un travailleur à plein temps, cette limite serait respectée si le débit de dose sur la surface externe d'une barrière ne dépassait pas $25 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$. Il savait également que la limite de dose individuelle pour les personnes du public était le dixième de la dose limite pour l'irradiation professionnelle, d'où le critère d'un débit de dose de $2,5 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$.

L'équipe d'avant-garde de la CNEN, qui était arrivée à une conclusion analogue à partir de considérations différentes, a décidé dans un premier temps de ne pas modifier ce critère simple. En premier lieu, l'équipe a estimé qu'il n'était ni souhaitable ni politiquement acceptable de permettre que les habitants reçoivent des doses dépassant 5 mSv par an. Deuxièmement, elle a admis que le facteur d'occupation des habitations (dont dépend la durée quotidienne de l'irradiation) était supérieur au facteur correspondant pour une irradiation professionnelle. Par ailleurs, elle a initialement estimé que la décontamination prendrait environ trois mois (et que l'exposition ne durerait donc qu'un trimestre). Elle a jugé que les effets de ces deux considérations s'annulaient, ce qui confirmait la validité du critère de $2,5 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$. Après la phase initiale, toutefois, ce critère simple, concernant le niveau d'intervention, a été affiné et ajusté (voir 7.3).

W.F. et l'équipe de la CNEN sont ensuite allés sur le terrain du stade olympique à une extrémité duquel des tentes avaient été dressées pour accueillir les personnes contaminées. S'étant aperçu que rien n'avait été fait pour les décontaminer par crainte de contaminer l'eau, le personnel de la CNEN a ordonné que toutes ces personnes soient douchées. Leurs vêtements ont été mis dans des sacs. En outre, les physiciens ont installé les détecteurs pour trier les centaines de personnes qui, ayant entendu parler de l'accident, attendaient au stade pour être contrôlées.

Le mercredi 30 septembre à 3 heures, le coordonnateur a rendu compte au siège de la CNEN. Selon lui, la situation était critique et nécessitait des ressources considérables.

Le 30 septembre au matin, le coordonnateur s'est occupé des restes de la source qui étaient dans la cour de la Vigilância Sanitária. Une petite grue a été utilisée pour faire passer un élément de canalisation au-dessus du mur de 2 m de haut et le descendre de manière à y enfermer la chaise. Du ciment a ensuite été injecté par-dessus le mur dans la canalisation pour recouvrir la chaise et la source. A la suite de cette intervention, le débit de dose a considérablement diminué dans cette zone, dont l'accès a pu être autorisé, la contamination ne présentant pas de graves problèmes à cet endroit. L'opération s'est terminée en début d'après-midi.

4.4. ANTENNE MEDICALE DE LA CNEN

Un médecin de la CNEN-IRD est arrivé par avion le mercredi 30 septembre à 6 h 30 avec deux autres physiciens de l'IRD. Arrivé au stade, le médecin a constaté

que son collègue de l'hôpital pour les maladies tropicales — le premier qui ait pensé que les symptômes des patients qu'il avait déjà examinés pouvaient être dus à une irradiation — était resté toute la nuit au stade et avait déjà trié les personnes qui y avaient été envoyées. Vingt-deux autres personnes présentaient des symptômes de surexposition. Onze avaient déjà été envoyées à l'Hôpital pour les maladies tropicales.

Les personnes transférées à cet hôpital ayant déjà été prises en charge par d'autres médecins, le médecin de la CNEN est resté au stade avec son collègue de l'Hôpital pour les maladies tropicales pour établir des dossiers médicaux et effectuer des examens. A la fin de la journée, les deux médecins avaient examiné de 50 à 70 autres personnes contaminées. Il a été procédé à bien d'autres actes médicaux entre ce moment-là et le 3 octobre. Ils sont émunérés au chapitre 5.

4.5. RENFORCEMENT DE L'INTERVENTION

Le mardi 29 septembre à 17 heures, le Directeur de l'IRD a appelé son prédécesseur pour le prier de se rendre à Goiânia et d'assumer les fonctions de coordonnateur adjoint, à la demande du coordonnateur. A ce moment-là, l'origine de la contamination n'avait pas encore été clairement établie, et les renseignements disponibles sur la source radioactive ne disaient rien sur sa forme chimique. La dispersion de la source radioactive inquiétait beaucoup le coordonnateur. Sachant qu'une source au cobalt métal n'aurait pu se disperser aussi facilement, il en avait conclu qu'il s'agissait probablement de césium sous la forme d'un sel, tel que le chlorure de césium. Il s'est révélé difficile d'en obtenir la confirmation. Le 30 septembre à 9 heures, le coordonnateur a été enfin informé que la contamination était due à du césium et que six ou sept personnes avaient été hospitalisées.

Le coordonnateur adjoint, deux médecins et des techniciens en radioprotection sont arrivés de Rio de Janeiro par avion à 16 heures. Le stade olympique était assiégé par une foule composée de gens concernés par l'accident, d'autres qui cherchaient à être rassurés et de curieux, sans compter les journalistes. Les sites contaminés avaient été isolés par des barrières dans la nuit du 29 au 30 septembre, ce qui avait effrayé la population, aucune déclaration officielle n'ayant encore été faite sur l'accident. Le groupe s'est immédiatement rendu à une réunion d'information convoquée par le coordonnateur et les autorités locales et consacrée aux zones contaminées, aux opérations d'évacuation et à l'attitude à adopter vis-à-vis des personnes contaminées isolées au stade.

4.6. ORGANISATION INITIALE

Sur la base d'un rapport qu'il avait lu sur l'incident survenu au Mexique en 1983, le coordonnateur adjoint a recommandé qu'avant toute opération de nettoyage

soit faite une enquête approfondie et rédigé un rapport complet sur les niveaux de contamination. Cette recommandation a été acceptée; sa mise en œuvre a été une étape importante de la planification de l'intervention. Le quartier général de la CNEN a d'abord été établi sous la tribune du stade, où il est resté plus de quatre jours jusqu'à ce que l'OSEGO, le Secrétariat à la santé de l'Etat de Goiás, fournisse des locaux à son siège.

Au cours de cette période, les tentes servant d'abris ont été emportées par un violent orage, ce qui a gêné les opérations pendant quelque temps. C'était un avant-goût des conditions météorologiques très défavorables dans lesquelles des travaux de décontamination ont été exécutés par la suite.

Au départ, cinq personnes seulement s'occupaient de la radioprotection, dont W.F. et le physicien de l'IGR. Le 30 septembre, le coordonnateur a demandé une aide supplémentaire, donnant le nom des personnes qu'il faudrait affecter à chaque tâche, d'après le plan d'action établi. Ces personnes ont été choisies sur la base de leurs qualités professionnelles, compte tenu de leur aptitude à travailler sous pression. Le jeudi 1^{er} octobre, 15 personnes sont arrivées en renfort. Les 20 personnes alors disponibles ont été réparties en trois groupes chargés de la gestion, du contrôle des zones et de la décontamination. Ce dernier groupe a été subdivisé en quatre sous-groupes affectés chacun à l'une des principales zones contaminées.

La presse et le public s'intéressaient naturellement à ce qui se passait et le personnel d'intervention restreint a dû consacrer une partie de son temps précieux à répondre à leurs questions. Il aurait été en fait très utile de désigner dès le départ un attaché de presse, ultérieurement secondé par des personnes chargées de l'information du public.

Ce n'est qu'à partir du troisième jour que des dossiers ont pu être tenus car le personnel était jusque-là trop occupé à faire des mesures et à former d'autres personnes au dépistage de la contamination. A ce stade, il est apparu nécessaire de fournir un soutien administratif au personnel technique. Tout le personnel a été logé dans un hôtel situé à deux kilomètres environ de la zone contaminée, ce qui a facilité les opérations. A partir du jour où le quartier général a déménagé dans les locaux de l'OSEGO, le samedi 3 octobre, l'organisation s'est progressivement améliorée grâce au soutien administratif qui a été obtenu sous forme notamment de services de secrétariat, de télex et de photocopie. Un coordonnateur de l'information a été désigné. Toutes les personnes participant à la décontamination devaient présenter chaque jour des rapports oraux et écrits qui permettaient d'apporter les aménagements nécessaires à la stratégie générale. Rétrospectivement, il semble qu'il aurait été bon de désigner officiellement un rédacteur.

Le samedi 3 octobre, de nouvelles ressources ont été mises à la disposition des équipes et un levé radiologique plus détaillé des sites a été fait. L'équipe de contrôle en poste au stade a décompté 249 porteurs d'une contamination décelable. Ceux qui n'étaient contaminés qu'extérieurement ont été rapidement décontaminés, mais 129 personnes qui avaient subi également une contamination interne ont dû recevoir

des soins médicaux. Les principaux sites contaminés avaient été repérés et, si les équipes cherchaient encore à savoir si d'autres sites avaient pu l'être, la phase initiale de l'intervention visant à maîtriser la situation et à éviter tout risque d'exposition grave pour d'autres personnes était terminée.

Des plans qui avaient été demandés le mercredi 30 septembre ont été reçus le vendredi 2 octobre et tous les points chauds ont été marqués. Le samedi 3 octobre, les habitants des zones où le débit de dose dépassait $2,5 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ avaient été évacués. (Les critères d'intervention sont examinés dans la partie III.)

4.7. PREMIERS SOINS DISPENSES AUX ACCIDENTES

Il fallait en priorité traiter les 11 patients les plus gravement touchés qui avaient déjà été admis à l'Hôpital pour les maladies tropicales ou à l'Hôpital Santa Maria. Ces patients ont été transférés à l'Hôpital général de Goiânia au troisième étage d'une aile, qui avait été tout entier libéré de manière qu'ils puissent être rassemblés en un lieu où les conditions radiologiques et biologiques puissent être contrôlées.

Comme on pouvait s'y attendre, le personnel médical de cet hôpital local n'avait ni la formation ni la préparation nécessaires pour soigner des patients ayant subi une contamination radioactive. Les malades n'ont donc pas reçu de soins avant l'arrivée des deux spécialistes. En plus, une grève était en cours à ce moment-là. Les médecins et les techniciens en radioprotection étaient équipés d'appareils de mesure et des vêtements de protection habituels (casques, gants, combinaisons). Une zone de contrôle de la contamination a été mise en place, conformément aux recommandations du rapport n° 65 de l'USNCRP¹. Les médecins ont procédé à des examens cliniques et en laboratoire, prélevé des échantillons de sang et traité les symptômes.

Le mercredi 30 septembre à 18 h 30, un médecin de la FURNAS de Rio de Janeiro s'est joint à l'équipe médicale. Le triage a duré 12 heures. Les médecins ont décidé d'envoyer six des 11 patients au service spécialisé de l'Hôpital naval Marcilio Dias à Rio de Janeiro. La sélection s'est faite en fonction du degré de gravité des symptômes et des besoins en appareils spéciaux pour le traitement. Le jeudi 1^{er} octobre à 9 heures, le médecin de FURNAS et les six patients sont partis par avion pour Rio de Janeiro; ils ont été admis à l'Hôpital naval Marcilio Dias à 12 h 30. Quatre autres patients ont été envoyés à cet hôpital le 3 octobre.

¹ UNITED STATES NATIONAL COUNCIL ON RADIATION PROTECTION AND MEASUREMENTS, Management of Persons Accidentally Contaminated with Radionuclides, Rep. No 65, USNCRP, Bethesda, MD (1980).

4.8. TRANSITION VERS UNE PHASE DE CONTROLE A LONG TERME

Le samedi 3 octobre, la situation était maîtrisée. Les équipes d'intervention ont alors axé leurs efforts sur le traitement des blessés et l'amélioration de la situation sur les sites contaminés. Après avoir travaillé sous pression, elles ont poursuivi leur action sans précipitation. Des plans ont été établis pour les mois suivants. D'autres levés radiologiques indispensables ont été faits et les besoins évalués. Des consignes ont été rédigées concernant les restrictions d'accès, le contrôle de la qualité des appareils et le choix des tests cytogénétiques et autres tests sanguins; des spécifications ont été définies pour les conteneurs destinés à recevoir les déchets. Ces actions et celles qui ont suivi peuvent être divisées entre celles qui concernent les personnes touchées et celles qui concernent la décontamination de l'environnement. Elle sont décrites respectivement dans les parties II et III ci-après.

Chacun des principaux champs d'activité — médecine, mesures radiologiques et décontamination, dosimétrie, gestion des déchets, réaction du public — fait l'objet d'un chapitre distinct du rapport. Ces chapitres sont suffisamment détaillés pour que les spécialistes disposent de la documentation nécessaire pour tirer des enseignements de l'accident de Goiânia.

Partie II

CONSEQUENCES POUR L'HOMME: ACTION EN FAVEUR DE LA POPULATION CONCERNEE

5. ACTION MEDICALE

6. DOSIMETRIE

5. ACTION MEDICALE

5.1. INTRODUCTION

L'accident radiologique de Goiânia a eu de graves conséquences médicales et a fait quatre morts. Cependant, il n'est pas sans rappeler plusieurs autres accidents qui avaient fait des blessés dans la population. Il présente avec les accidents survenus à Mexico en 1962, en Algérie en 1978, au Maroc en 1983 et à Ciudad Juárez (Mexique) en 1983 des analogies frappantes, notamment: irradiation globale significative suivie du syndrome d'irradiation aiguë et accompagnée de graves brûlures localisées chez certains patients. L'accident de Ciudad Juárez a entraîné la contamination externe de plusieurs personnes par du cobalt 60, mais les niveaux étaient faibles et il n'y a pas eu de contamination interne significative.

L'une des particularités de l'accident de Goiânia consiste en une grave contamination interne et externe par le césium 137 qui a compliqué les soins et exigé, pour la première fois dans l'histoire des accidents radiologiques, le recours massif au ferrocyanure $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ (sous forme de bleu de Prusse ou Radiogardase^R). Cet accident a cela d'unique que les victimes ont subi une irradiation globale aiguë, suivie d'une irradiation interne chronique à faible débit due à une contamination par le césium 137. Les expositions étaient inégales, selon le temps passé près de la source et la quantité de césium 137 absorbée.

Les aspects radiologiques de l'accident étaient d'autant plus complexes que les renseignements sur les durées d'exposition étaient incomplets et qu'on ne savait pas exactement à quel moment l'irradiation avait commencé. Parfois, l'irradiation externe a certainement été fractionnée, en raison de l'horaire de travail et des habitudes des victimes. En outre, les personnes les plus gravement surexposées ont subi de graves lésions aussi bien cutanées (rayonnement bêta) que profondes (rayonnement gamma pénétrant). Ces différences de nature des expositions (et les incertitudes qui en découlent) ont compliqué l'interprétation des valeurs de la dose estimées par des méthodes cytogénétiques et fondées sur des courbes de la relation dose-effet établies à partir de débits de dose élevés.

L'accident, qui a été découvert le 28 septembre, a été confirmé par les mesures radiologiques faites le 29 septembre (par W.F., spécialiste en physique médicale et le personnel de santé de l'Etat de Goiás); le dispositif d'intervention d'urgence de la CNEN a alors été mis en place. Un médecin, un spécialiste de la dosimétrie et un technicien en radioprotection ont été envoyés de Rio de Janeiro à Goiânia dans la matinée du 30 septembre. Lorsque ce groupe est arrivé, la situation sur les quatre principaux sites contaminés de la ville avait été maîtrisée, les habitants avaient été évacués des environs de ces sites et un centre de contrôle radiologique et de triage médical avait été établi au stade olympique de Goiânia. Vingt-deux accidentés étaient rassemblés au stade lorsque l'équipe médicale est arrivée. Il s'agissait des occupants

des maisons voisines de l'endroit où la source avait été ouverte, et de parents ou employés des propriétaires des deux dépôts de ferraille où avaient été apportés des fragments de l'appareil de téléthérapie au césium 137.

En arrivant au stade olympique, l'équipe médicale a appris que 11 des personnes contaminées avaient été admises le 28 septembre à l'Hôpital pour les maladies tropicales et à l'Hôpital Santa Maria de Goiânia, sur instruction des services sanitaires locaux. On supposait alors que ces personnes souffraient d'intoxication alimentaire, de dermatite de contact ou de pemphigus, maladie assez répandue dans le centre du Brésil. Il est apparu plus tard que la plupart d'entre elles s'étaient plaintes de nausées, vomissements, diarrhée, vertiges et fatigue. Toutes, sauf une, présentaient des lésions cutanées radio-induites plus ou moins étendues sur les mains, les pieds, les jambes ou en d'autres endroits du corps (voir les photographies 25, 26, 28 à 31).

5.2. PHASE INITIALE DE L'INTERVENTION

A son arrivée au poste du stade olympique, l'équipe médicale a été mise au courant de la situation par les autorités locales. Les 22 personnes rassemblées au stade ont fait l'objet d'un contrôle radiologique; toutes étaient porteuses d'une contamination externe au césium 137. On leur a fait enlever leurs vêtements contaminés et toutes ont été décontaminées dans plusieurs bains d'eau savonneuse. Ces mesures ont été efficaces à 50-80%, comme l'ont montré des détecteurs à main. Après décontamination, les personnes ont été interrogées pour savoir si leurs antécédents médicaux étaient compatibles avec les signes et symptômes du syndrome d'irradiation aiguë. Des fiches médicales avaient été remplies et des examens médicaux rapides effectués pour les 22 personnes avant 18 heures le 30 septembre. Entre-temps, deux autres médecins et du personnel de radioprotection avaient été envoyés de Rio de Janeiro. Les deux médecins avaient appris à donner des soins aux irradiés. L'un d'eux avait suivi un cours intensif de trois mois (comme boursier de l'AIEA) sur la maîtrise des accidents radiologiques, quelques mois avant l'accident de Goiânia.

L'équipe médicale a estimé que le plus urgent était de traiter les 11 patients qui se trouvaient déjà à l'Hôpital pour les maladies tropicales et à l'Hôpital Santa Maria. Cette décision était motivée par les renseignements fournis par le personnel hospitalier sur l'état des patients. Dans la soirée du 30 septembre, les 11 patients ont été transférés de l'Hôpital pour les maladies tropicales et de l'Hôpital Santa Maria dans un service spécial de l'Hôpital général de Goiânia.

A l'Hôpital général de Goiânia, l'équipe médicale (trois médecins et des assistants techniques) a entrepris de lutter contre la contamination et l'exposition en se fondant sur les résultats d'un levé radiologique. Elle a mis au point un plan d'action

en s'inspirant des recommandations contenues dans le rapport n° 65 de l'USNCRP¹ et des connaissances de ses membres sur la gestion des accidents radiologiques. Les accidentés ont été examinés et leurs fiches médicales établies. Tous ces patients souffraient du syndrome d'irradiation aiguë ou de lésions cutanées radio-induites plus ou moins étendues, et avaient subi une contamination externe et interne au césium 137. Les mesures radiologiques au-dessus des lésions cutanées ont indiqué des débits de dose allant jusqu'à $15 \text{ mSv} \cdot \text{h}^{-1}$ et, dans le cas d'une petite fille de six ans, un débit de dose moyen de $3 \text{ mSv} \cdot \text{h}^{-1}$ au contact de la peau.

Des échantillons de sang, d'urines et de selles ont été prélevés chez tous les irradiés. La contamination interne au césium 137 a été confirmée par comptage des échantillons d'urines et de selles. La peau de tous les patients a été décontaminée au moyen de savon doux et d'eau, d'acide acétique et de dioxyde de titane. Cette décontamination n'a été que partiellement efficace, car la sudation a entraîné une nouvelle contamination de la peau par le césium 137 interne.

Le 1^{er} octobre au matin, la décision a été prise de transférer (en avion militaire) six des 11 patients au centre de soins tertiaire de l'Hôpital naval Marcilio Dias à Rio de Janeiro. Cette décision se fondait sur les critères cliniques suivants: antécédents médicaux, symptômes et signes prémonitoires, délai d'apparition des vomissements et nombre des manifestations, gravité des lésions cutanées, dépilation et estimations de la teneur du corps en radiocésium fondées sur des mesures radiologiques. La numération globulaire n'était alors pas fiable. Les six patients ont été envoyés par avion à Rio de Janeiro avec l'un des médecins de l'équipe. Le 3 octobre, quatre autres patients dont l'état s'aggravait l'ont été également.

Ce jour-là, la gravité de l'accident ne faisait plus de doute et les effectifs de soutien ont été considérablement augmentés. Jusqu'à ce que le besoin prévu d'un anthroporadiamètre se fit sentir, les appareils et fournitures nécessaires pour les premiers soins ont suffi. Il avait été prévu que les stocks de bleu de Prusse (Radiogardase^R) du Brésil seraient rapidement épuisés, de sorte qu'une nouvelle commande a été passée à la Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung (Société pour la recherche sur les rayonnements et l'environnement) de Neuherberg (République fédérale d'Allemagne).

A l'Hôpital général de Goiânia, l'équipe médicale de base du service spécial était au complet le 7 octobre. Les soins médicaux n'ont pas été réduits pendant la période intérimaire. Certains membres du personnel de laboratoire se sont inquiétés pour leur propre santé, mais ont été rassurés par les explications que leur ont données les deux médecins traitants. En revanche, les médecins généralistes de Goiânia ont beaucoup hésité à se mobiliser. Un autre médecin hospitalier s'est quand même joint à l'équipe médicale de Goiânia. Les moyens du service des urgences médicales de

¹ UNITED STATES NATIONAL COUNCIL ON RADIATION PROTECTION AND MEASUREMENTS, Management of Persons Accidentally Contaminated with Radionuclides, Rep. No 65, USNCRP, Bethesda, MD (1980).

l'Hôpital général de Goiânia ont été complétés au cours de la première semaine de novembre, avec la mise en place d'un anthroporadiamètre spécialement conçu pour mesurer les débits de dose élevés (voir la photographie 32).

A Rio de Janeiro, l'Hôpital naval Marcilio Dias a rapidement mobilisé le personnel d'intervention pour les urgences radiologiques et a ouvert des salles qui avaient été affectées antérieurement à l'accueil et au traitement des irradiés. Les craintes exprimées par certains membres du personnel du laboratoire ont été apaisées par les explications qui leur ont été fournies grâce à l'installation d'un laboratoire spécial à proximité des salles de traitement des patients.

5.3. TRAITEMENT

Les procédés thérapeutiques appliqués durant la phase critique de l'intervention d'urgence ont consisté notamment:

- à surmonter la phase critique du syndrome d'irradiation aiguë caractérisée par l'aplasie médullaire;
- à traiter les radiolésions locales;
- à éliminer le césium 137 contenu dans le corps;
- à donner des soins de psychothérapie et de médecine générale.

5.3.1. Traitement du syndrome d'irradiation aiguë

Pour les patients les plus gravement irradiés, le traitement a consisté à évaluer et à gérer la crise hématologique associée au syndrome d'irradiation aiguë. En interrogeant les patients, en établissant des hémogrammes et en reconstituant l'accident, les médecins se sont efforcés de déterminer le jour où l'irradiation a commencé, la durée de celle-ci, les doses estimatives (au moyen de techniques cytogénétiques) et la gravité de la contamination interne par le césium 137. Ces données ont permis de prévoir la gravité de l'aplasie médullaire et le degré correspondant de vulnérabilité aux infections. Les techniques cytogénétiques ont montré que les doses reçues par les irradiés hospitalisés à Rio de Janeiro allaient de 1 à 7 Gy. Ces estimations, difficiles du fait des rayonnements émis en permanence par le césium 137 interne, ont néanmoins permis d'établir un pronostic et de prévoir la solution des problèmes médicaux liés à l'aplasie médullaire. L'intervention médicale s'est donc fondée sur l'observation clinique de chaque malade et non pas spécialement sur la dosimétrie par analyse cytogénétique.

Différentes cultures (sang, peau, blessures et orifices du corps) ont été réalisées afin d'identifier les infections bactériennes, fongiques et virales. D'après le résultat de ces cultures et le tableau clinique, les patients ont été traités au moyen d'agents systémiques ou topiques antibactériens, antifongiques ou antiviraux.

Les mesures principales appliquées par le personnel médical ont été les suivantes:

- a) isolement des irradiés dans des chambres aseptiques;
- b) régime alimentaire sans légumes ou autres aliments crus;
- c) soins des ongles;
- d) application de néomycine dans les fosses nasales;
- e) désinfection intestinale, lorsque la concentration des leucocytes neutrophiles était inférieure à $1,5 \times 10^9 \cdot L^{-1}$, par administration orale de triméthoprime/sulfaméthoxazole et de nystatine;
- f) administration systémique d'antibiotiques lorsque la fièvre dépassait $38,5^\circ C$ ou qu'il y avait d'autres signes d'infection chez les patients atteints d'agranulocytose (concentration de leucocytes neutrophiles inférieure à $0,75 \times 10^9 \cdot L^{-1}$); le mélange empirique d'antibiotiques qui se composait de gentamycine, céfalotine et carbénicilline a été remplacé par un mélange de céfopérazone, imipénème et/ou pipéracilline² en fonction de l'évolution et/ou des cultures; de l'amphotéricine B a été administrée lorsque la fièvre persistait au-delà de 48 à 72 heures;
- g) transfusion de globules déplasmatisés irradiés (25 Gy) et perfusions de plaquettes pour maintenir le niveau d'hémoglobine au-dessus de $1,55 \text{ mmol} \cdot L^{-1}$ ($0,1 \text{ kg} \cdot L^{-1}$) et celui des plaquettes au-dessus de $20 \times 10^9 \cdot L^{-1}$, ou chaque fois qu'un saignement survenait chez un malade présentant une numération des plaquettes inférieure à $60 \times 10^9 \cdot L^{-1}$;
- h) administration d'Acyclovir, trois semaines environ après l'irradiation, pour empêcher l'activation du virus de l'herpès;
- i) administration d'anthelminthiques, tels que le mébendazole et le thiabendazole, en fonction des résultats des examens des selles ou empiriquement (éosinophilie).

Il est apparu, d'après les observations cliniques et les résultats des examens en laboratoire, qu'aucune greffe de moelle osseuse n'était nécessaire.

L'un des traits originaux de la thérapeutique adoptée dans cet accident radiologique a été le recours au facteur de stimulation de colonies de granulocytes microphages, qui a été administré à huit patients hospitalisés à Rio de Janeiro. Quatre des irradiés qui ont suivi ce traitement et avaient reçu des doses allant de 4 à 6 Gy sont décédés par suite de complications hémorragiques et infectieuses. Les quatre autres personnes auxquelles ce traitement a été appliqué et qui ont survécu sont, dans le groupe des surexposés, parmi celles qui avaient reçu les doses les plus faibles (2,5–4,4 Gy). Deux patients, qui avaient reçu de fortes doses (6,2 et 7,1 Gy) et souffraient d'une grave aplasie médullaire mais n'ont pas été soumis au traitement, ont survécu.

² Deux irradiés ont reçu de la vancomycine et un troisième de l'amikacine et de la céfoxitine.

5.3.2. Traitement des radiolésions localisées

Des lésions cutanées radio-induites ont été observées chez 19 des 20 patients hospitalisés. On notait chez eux des œdèmes, érythèmes, pigmentation, escarres et phlyctènes qui touchaient les mains, les pieds, les jambes, les aisselles et de nombreux points de la poitrine, de l'abdomen, du visage, des bras et de la région antéro-médiane des jambes. (Voir les photographies 25, 26, 28 à 31.) Durant la première semaine d'octobre 1987, la plupart des lésions cutanées se sont ouvertes et ont suinté. Aucun problème grave d'infection ne s'est posé.

Le 12 octobre, on constatait une escarrification du tissu nécrotique et une réépithélialisation, ce qui venait confirmer qu'il s'agissait de lésions superficielles dues à des rayonnements bêta. (Voir la photographie 31.) Quelque trois semaines plus tard, des lésions profondes apparaissaient chez dix des 20 patients, ce qui indiquait une irradiation gamma des couches tissulaires plus profondes. (Voir la photographie 26.)

Toutes les lésions cutanées étaient contaminées par du césium 137; des débits de dose allant jusqu'à $15 \text{ mSv} \cdot \text{h}^{-1}$ ont été mesurés à proximité de certaines d'entre elles. Les niveaux de contamination ont été sensiblement réduits par l'escarrification du tissu nécrotique et par de nouvelles mesures de décontamination. Tant à Rio de Janeiro qu'à Goiânia, les brûlures localisées ont été traitées par des applications topiques de solutions antiseptiques et analgésiques, de crèmes antibiotiques, de néomycine, de suc d'*Aloe vera* (thromboxane inhibiteur) et d'alantoïne (anti-inflammatoire). Pour les patients traités à Goiânia, deux thérapies supplémentaires ont été adoptées: des injections d'un facteur d'activation antiplaquettaire destiné à limiter les lésions des capillaires et des injections de vasodilatateurs, tels que Trental et Iridux. L'évolution clinique a été à peu près la même dans les deux hôpitaux.

La visualisation du pool sanguin a été utilisée à l'Hôpital naval Marcilio Dias, ce qui a permis de distinguer les artérioles endommagées des artérioles normales. Cette méthode a également été utile dans le cas d'un patient qu'il a fallu amputer le 15 octobre. Dans les 48 heures, le tableau clinique s'est amélioré et le patient a survécu au syndrome d'irradiation aiguë. Ultérieurement, cinq autres patients ont dû subir des interventions chirurgicales, qui ont consisté en quatre débridements et une greffe de peau.

5.3.3. Accélération de l'élimination du césium 137

Le niveau de contamination au césium 137 provoqué par l'accident de Goiânia est le plus élevé qui ait jamais été cliniquement observé. Sur les 112 000 personnes contrôlées à Goiânia, 249 étaient extérieurement contaminées. Les mesures destinées à éliminer la contamination externe au césium 137 ont été efficaces pour les personnes n'ayant pas ou peu subi une contamination interne. Chez les autres, la peau était continuellement recontaminée sous l'effet de la sudation. La contamination interne

au césium 137 a posé un problème très particulier tant du point de vue médical que de celui de la radioprotection (les niveaux de la contamination interne sont examinés plus loin). La dose individuelle maximale due à cette contamination s'est accumulée à un débit initial de $0,25 \text{ Gy} \cdot \text{d}^{-1}$.

Dans l'accident de Goiânia, du bleu de Prusse (Radiogardase[®]) a été administré à 46 personnes à des doses allant de $1 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$ à $10 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$. La dose initiale administrée aux adultes était de $3 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$ également répartie en trois fois. Pour les patients ayant incorporé une quantité supérieure à cinq fois la limite annuelle d'incorporation pour le césium 137, la dose initiale était de $4 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$ à $6 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$, également répartie en quatre à six fois. La dose administrée aux 13 enfants était au départ de $1,0$ à $1,5 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$.

Il a été constaté, par analyse radiochimique de selles, qu'une augmentation de la dose de bleu de Prusse entraînait un accroissement de la radioactivité dans les échantillons et, par anthroporadiamétrie, qu'elle accélérât l'élimination du césium 137. Aucune courbe sur la relation dose-effet n'est encore disponible, mais la figure 11 montre cet effet de l'administration de bleu de Prusse chez un patient. A la suite de ces études, les adultes et adolescents les plus gravement contaminés ont reçu $10 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$ également répartis en huit à dix fois et les enfants $3 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$ également répartis en trois fois.

Des études plus détaillées relatives à l'effet du bleu de Prusse sur la période biologique du césium sont en cours. Des analyses radiochimiques et *in vivo* sont régulièrement faites sur des patients intérieurement contaminés.

Du fait qu'il n'existe pas de documentation sur l'administration de doses aussi élevées de bleu de Prusse, les équipes médicales ont surveillé de près pendant toute la durée du traitement l'éventuelle apparition d'effets secondaires. La teneur en potassium du sérum a été régulièrement mesurée deux fois par semaine et chaque fois que l'examen clinique semblait l'exiger. Aucune variation significative du niveau de potassium n'a été constatée. Des signes de constipation sont apparus chez quelques rares patients qui ont cependant bien réagi à un régime alimentaire approprié et à l'administration de laxatifs.

Des diurétiques ont été administrés aux patients accusant un niveau élevé de contamination interne lorsqu'il n'y avait pas de contre-indications cliniques. Ce traitement a été prescrit à 17 patients, dont six en avaient également besoin en raison d'une hypertension artérielle. Ont été ainsi administrés par voie orale $40 \text{ mg} \cdot \text{d}^{-1}$ de furosémide ou $50\text{--}100 \text{ mg} \cdot \text{d}^{-1}$ d'hydrochlorothiazide. Cependant, les résultats des analyses urinaires ayant montré que les diurétiques ne favorisaient pas l'élimination du césium 137, le traitement a été interrompu.

L'absorption quotidienne de trois litres d'eau enrichie en potassium a été prescrite pour certains patients qui présentaient un niveau élevé de contamination interne et étaient traités au bleu de Prusse et aux diurétiques.

Les niveaux élevés de contamination interne ont posé certains problèmes médicaux spécifiques en ce sens que tous les fluides et excréments ont dû être recueillis

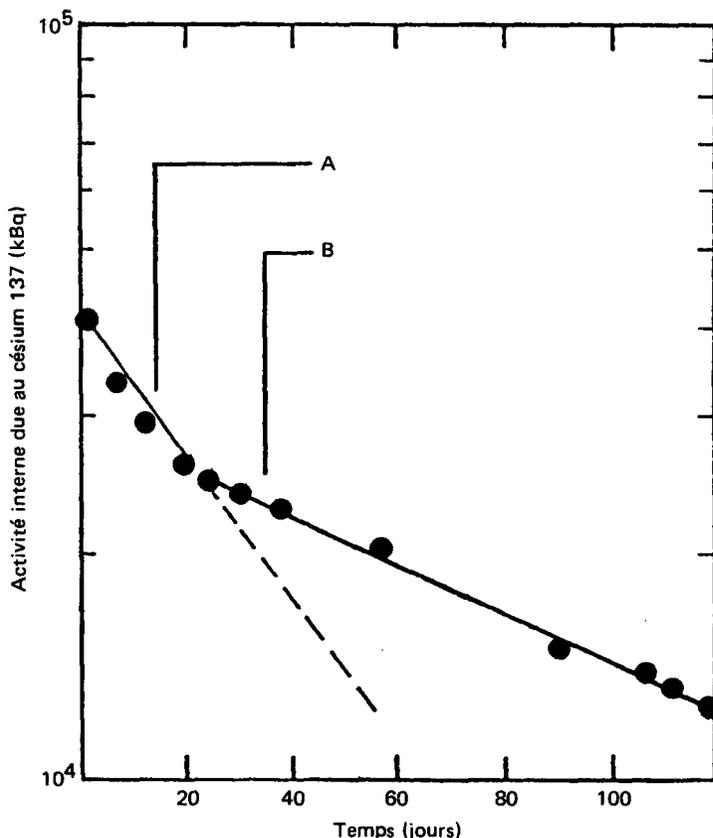


FIG. 11. Effet de l'administration de bleu de Prusse: diminution de la teneur du corps en matières radioactives dans le temps. A: administration de 10 g de bleu de Prusse par jour. B: après interruption du traitement.

et conservés pour analyse. Des mesures rigoureuses de lutte contre la contamination et l'irradiation ont dû être appliquées continûment pendant les trois mois d'hospitalisation afin que la présence d'irradiés ne crée pas de risque significatif pour la santé du personnel médical. Les doses accumulées par ce personnel ont été inférieures à 5 mSv pour toute la durée des traitements.

5.3.4. Psychothérapie et soins de médecine générale

Sont ainsi désignés les soins destinés à lutter contre les maladies diagnostiquées durant l'hospitalisation, c'est-à-dire l'hypertension artérielle, les insuffisances cardiaques et l'arythmie et les infections urinaires. Une large place a été faite à la psychothérapie destinée, non seulement à atténuer les suites psychologiques d'un

confinement prolongé et du traumatisme dû à l'accident lui-même, mais également à assurer le traitement psychiatrique de patients qui étaient déjà suivis pour troubles mentaux.

5.4. AUTOPSIES

Les médecins légistes ont procédé, avec l'aide de l'équipe médicale et des techniciens en radioprotection de l'Hôpital naval Marcilio Dias, à l'autopsie des cadavres des quatre patients décédés. Des prélèvements ont été réalisés aux fins d'études bactériologiques et histopathologiques.

5.4.1. Cas 1: M.F.1: Adulte de 38 ans de sexe féminin, décédée le 23 octobre 1987

Résultats de l'examen externe: Hématomes orbitaires, alopecie grave, pâleur des muqueuses, hémorragies sur le cou, le thorax, les conjonctifs, les bras, les jambes et la peau.

Résultats de l'examen des organes internes: Hémorragies diffuses dans tous les organes, particulièrement graves dans les poumons et le cœur. Sang fluide et sombre. Plaques hémorragiques sur tous les muscles moteurs. Oedème cérébral. Nombreux foyers hémorragiques sur les leptoméniges. Le liquide céphalorachidien était xanthochromique. Nombreuses zones hémorragiques dans les séreuses intestinales et gastriques. Les lumières de ces organes contenaient des quantités importantes de matières fécales mélangées de sang. Oedèmes et pétéchiés diffus dans les muqueuses intestinale et gastrique. Le foie était dilaté et mou.

Impression générale: Diathèse hémorragique largement disséminée (syndrome d'irradiation aiguë). Oedème cérébral et hémorragies pétéchiées (peut-être secondaires à une septicémie).

5.4.2. Cas 2: L.F.2: Enfant de six ans de sexe féminin, décédée le 23 octobre 1987

Résultats de l'examen externe: Oedèmes importants sur la face, le cou et le tiers supérieur du thorax; pâleur des muqueuses. Taches multiples d'alopecie. Nombreuses aires de pétéchiés sur la peau, les muqueuses et les conjonctifs. Multiples zones de desquamation sèche de l'épiderme avec des zones d'hyperpigmentation. Zones d'ulcération dermique, en particulier sur l'abdomen, la zone périombilicale et les jambes. Large zone de nécrose sur la paume de la main gauche, touchant également les doigts. Taches sombres sur la plante des pieds.

Résultats de l'examen des organes internes: Multiples zones hémorragiques en plaques et en taches dans tous les muscles moteurs. Organes internes largement infiltrés de zones hémorragiques. Poumons et cœur particulièrement touchés par des hémorragies diffuses. Les lumières de l'estomac et des intestins contenaient des matières hémorragiques; les muqueuses participaient également au processus hémorragique. Hémorragies dans les bassinets. Ecchymoses et hémorragies pétéchiâles également constatées dans les séreuses et les leptoméniges cérébrales et médullaires. Le liquide céphalorachidien était clair.

Impression générale: Diathèse hémorragique disséminée (secondaire au syndrome d'irradiation aiguë). Pneumonie hémorragique et néphrite hémorragique, myomalacie du myocarde.

5.4.3. Cas 3: I.S.: Adulte de 22 ans de sexe masculin, décédé le 27 octobre 1987

Résultats de l'examen externe: Pâleur des muqueuses. Hémorragies des conjonctifs et des muqueuses et pétéchiâs sur la peau. Multiples zones dermiques dépigmentées avec desquamation. Foyers de nécrose et inflammations localisées particulièrement graves à la face interne des cuisses, au scrotum et au pénis et dans la zone inguinale et fessière. Zones de nécrose et de desquamation épidermique sur la paume des mains.

Résultats de l'examen des organes internes: Ecchymoses et pétéchiâs dans les séreuses, particulièrement graves au péricarde. Les poumons étaient fermes, hémorragiques et contenaient une faible quantité d'air. A la coupe, leur surface présentait de légers renflements jaunâtres légèrement surélevés. Adhérences fibrineuses dans les espaces interlobaires. Le ventricule droit du cœur était dilaté. Pétéchiâs et ecchymoses dans le myocarde de la région interventriculaire et sous l'endocarde. Pétéchiâs dans les muqueuses gastrique et intestinale. Hyperplasie généralisée des ganglions lymphatiques. Hyperhémie des leptoméniges.

Impression générale: Broncho-pneumonie hémorragique bilatérale (secondaire à une irradiation de l'organisme entier). Pleurésie fibreuse, hypertrophie du ventricule droit. Hyperplasie ganglionnaire.

5.4.4. Cas 4: A.S.: Adolescent de 18 ans de sexe masculin, décédé le 28 octobre 1987

Résultats de l'examen externe: Pâleur des muqueuses généralisée. Alopécie grave et généralisée. Nombreuses zones d'hyperchromie épidermique avec desquamation mais sans foyers inflammatoires. Zones de desquamation avec nécrose sur la paume de la main gauche.

Résultats de l'examen des organes internes: Congestion diffuse de tous les organes. Poumons dilatés, avec zones hémorragiques en particulier dans les lobes inférieurs où, à la coupe, on notait de petits renflements. Le cœur était dilaté, à cause principalement d'une hypertrophie du ventricule droit. Pétéchies hémorragiques sous-endocardiques et sous-péricardiques. Pétéchies dans les muqueuses gastrique et intestinale. Les muscles moteurs présentaient plusieurs ecchymoses, moins importantes cependant que celles des deux premiers cas. Pétéchies dans le foie, la rate, les reins, le pancréas et les glandes surrénales.

Impression générale: Broncho-pneumonie hémorragique bilatérale. Diathèse hémorragique circulatoire et cardiaque généralisée (secondaire au syndrome d'irradiation aiguë). Hypertrophie du ventricule droit.

6. DOSIMETRIE

Dès que l'accident de Goiânia a été découvert, il est apparu clairement que de nombreuses personnes avaient été exposées à une irradiation externe, à une contamination de la peau et à une contamination interne dans des proportions diverses. Différentes techniques de dosimétrie ont été utilisées pour obtenir les indications nécessaires aux premières activités de dépistage des personnes susceptibles d'avoir été exposées, au traitement médical des patients et à une évaluation scientifique globale de l'accident. Les principales techniques utilisées ont été les suivantes:

- dosimétrie interne: biodosage et anthroporadiamétrie;
- analyse cytogénétique: estimation des doses par analyse des aberrations chromosomiques;
- dosimétrie externe: estimation des doses d'après des reconstitutions et les effets des rayonnements.

Ces techniques, les moyens employés, les difficultés rencontrées et les résultats obtenus sont exposés ci-après.

6.1. DOSIMETRIE INTERNE

6.1.1. Méthodes

Les voies potentielles de contamination interne étaient l'inhalation, l'ingestion et les blessures. L'inhalation a été jugée secondaire, ce que sont d'ailleurs venues confirmer les valeurs de la contamination atmosphérique et d'autres indications. Il fallait avant tout recenser les personnes porteuses d'une contamination interne de sorte que les premières mesures ont été axées sur l'estimation des incorporations par un examen des échantillons d'urines et de selles. Compte tenu des niveaux de radioactivité, les échantillons ont dû être recueillis avec beaucoup de précautions pour éviter qu'ils ne se contaminent mutuellement. Prélevés à Goiânia, les échantillons ont été envoyés par avion à Rio de Janeiro pour analyse. Les premiers échantillons étaient souvent si radioactifs qu'un simple débitmètre de dose portatif indiquait des valeurs élevées. Cet appareil de mesure simple a donc été employé aussi bien pour le tri des malades hospitalisés que pour l'identification des échantillons exigeant un traitement spécial. Pour les analyses biochimiques, des étalons de césium 137 ont été préparés pour l'urine et les selles. On s'est aperçu par la suite qu'un fantôme était nécessaire pour les couches jetables car des bébés étaient porteurs d'une contamination interne au césium 137.

Du fait que les personnes contaminées appartenaient à des classes d'âge très différentes, on a estimé nécessaire d'adopter des modèles tenant compte de l'âge pour fournir aux médecins les données pertinentes, telles que les incorporations de

TABLEAU III. VARIATION, SELON L'AGE, DE LA DOSE ENGAGEE SUR 70 ANS DUE A UNE UNITE INCORPOREE DE CESIUM 137, SANS ADMINISTRATION DE BLEU DE PRUSSE

Biotype	Pourcentage restant après 15 jours	Dose engagée (Gy·Bq ⁻¹)
Nourrisson	66,7	$3,85 \times 10^{-8}$
Enfant (un an)	44,5	$7,82 \times 10^{-9}$
Enfant (cinq ans)	54,7	$7,13 \times 10^{-9}$
Enfant (dix ans)	61,1	$7,22 \times 10^{-9}$
Adolescent (15 ans)	74,5	$9,76 \times 10^{-9}$
Homme adulte	82,1	$9,94 \times 10^{-9}$
Femme adulte	82,1	$8,22 \times 10^{-9}$

césium, les taux d'excrétion et les profils des doses engagées (les doses reçues sur différentes périodes de temps). Des modèles par âge fondés sur des rapports du Laboratoire national d'Oak Ridge³ ont été utilisés à cette fin. Les modèles ont aussi permis par la suite d'évaluer l'efficacité du traitement de la contamination interne par le bleu de Prusse. Ils ont été établis pour les biotypes suivants: nourrissons, enfants d'un an, enfants de cinq ans, enfants de dix ans, adolescents de 15 ans et adultes. Le tableau III donne une idée de la variation de la dose engagée par unité incorporée en fonction de l'âge.

Au moment du tri, il a fallu fournir aux médecins des indications sur l'efficacité des méthodes d'élimination du césium 137, et en particulier sur les effets du bleu de Prusse. Les nucléides du césium sont normalement éliminés surtout par excrétion urinaire (80% dans l'urine et 20% dans les selles). L'effet du bleu de Prusse est d'accroître le taux d'excrétion fécale. Des échantillons d'urines et de selles de porteurs d'une contamination interne ont été recueillis quotidiennement et le rapport entre les excrétions fécale et urinaire a été établi chaque jour. Il est immédiatement apparu que, dans la plupart des cas, le bleu de Prusse entraînait une nette augmentation du taux d'excrétion fécale, au point que cette excrétion était devenue le mode principal d'élimination. Dans certains cas, le rapport élimination fécale/élimination urinaire s'est même inversé, passant à 4:1. En général, l'effet produit a été fonction de la dose de bleu de Prusse administrée et du métabolisme du patient. Des études

³ OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY, Estimating Dose Rates to Organs as a Function of Age following Internal Exposure to Radionuclides, ORNL-TM-8265, Oak Ridge, TN (1984); également, ORNL-TM-8385, Oak Ridge, TN.

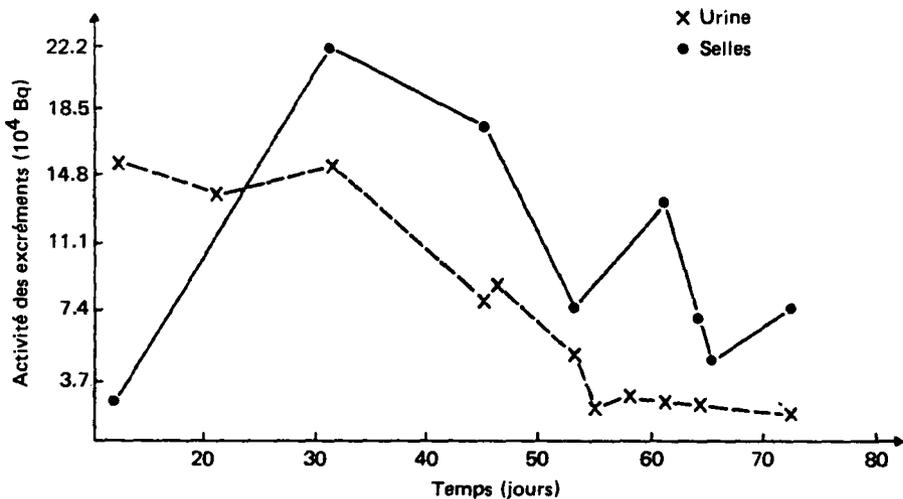


FIG. 12. Exemple représentatif de l'effet de l'administration de bleu de Prusse sur la radio-activité des excréments d'un patient.

se poursuivent sur la relation existant entre la quantité de bleu de Prusse administrée et le taux d'élimination fécale du césium, compte tenu de la quantité de césium déposée dans l'organisme et de facteurs métaboliques. On trouvera à la figure 12 un exemple de graphique donnant des taux d'élimination fécale et urinaire du césium.

L'étape suivante a consisté à évaluer quantitativement la capacité du bleu de Prusse à réduire la période biologique du césium présent dans le corps. A cette fin, un anthroporadiamètre de fortune a été installé début novembre à Goiânia. Les personnes qui avaient été intérieurement contaminées ont été régulièrement examinées, la fréquence des examens variant selon les quantités de césium incorporées et le traitement administré. Trois patients en traitement à l'Hôpital naval Marcilio Dias à Rio de Janeiro ont été examinés au moyen de l'anthroporadiamètre de l'IRD avant de rentrer à Goiânia, et les résultats étaient en bon accord avec ceux qui avaient été obtenus au moyen de l'appareil de fortune de Goiânia. Les résultats des différentes mesures sont donnés à la section 6.1.2.

Après l'accident de Goiânia, le laboratoire de Rio de Janeiro lui a été entièrement affecté. Les installations étaient initialement destinées à des analyses de routine d'échantillons d'excréments de basse activité de sorte que la haute activité des échantillons prélevés après l'accident a posé quelques problèmes, surtout au début, lorsque les échantillons étaient envoyés dans des colis non normalisés et auraient pu être contaminés.

Le laboratoire comportait deux entrées donnant l'une sur l'intérieur du bâtiment et l'autre directement sur l'extérieur. Cette particularité des lieux s'est révélée très commode, car on a pu appliquer des procédures normales de radioprotection au

personnel à l'entrée donnant sur l'intérieur du bâtiment et contrôler les mouvements et la contamination des échantillons à la porte extérieure.

Une pièce contiguë, qui était aussi directement accessible de l'extérieur, a servi de magasin pour les boîtes contenant les échantillons radioactifs avant et après analyse. Le sol du laboratoire a été recouvert d'une feuille de plastique pour faciliter la décontamination. Pendant les quatre premières semaines après l'accident, neuf personnes ont été affectées aux mesures de laboratoire et deux personnes au groupe d'évaluation des doses.

Après quatre semaines, les besoins ont évolué et un anthroporadiamètre de fortune a été installé à l'Hôpital général de Goiânia. L'appareil a été placé au centre d'une pièce de 4,0 m × 3,5 m, le sol étant recouvert de sept feuilles de plomb de 2 mm d'épaisseur. Après quelques essais, on a décidé d'utiliser un détecteur au NaI (Tl) de 200 mm de diamètre et 100 mm d'épaisseur, collimaté par un écran en plomb de 50 mm d'épaisseur et installé à quelque 2,2 m du sol. Une chaise longue en fibre de verre a été placée sous le détecteur, son point médian se situant à 2 m environ du centre de l'appareil.

Compte tenu des niveaux de radioactivité, de la nécessité de faire défiler les patients assez rapidement et des impératifs de la décontamination, des temps de comptage brefs (2 min par exemple) étaient recommandés. Le niveau de détection pour un temps de comptage de 2 min était de 9,1 kBq (247 nCi), avec un niveau de confiance de 95 %. Des procédures normales, telles que le changement des vêtements des patients et l'enregistrement de leur taille et de leur poids, ont été appliquées pour le comptage in vivo.

Ce système a fonctionné jusqu'au 14 janvier 1988; à cette date, l'appareil a été transféré Rua 57, près des premiers foyers de l'accident. Ces sites avaient alors été décontaminés et la CNEN y avait établi un laboratoire. La pièce dans laquelle l'anthroporadiamètre a été installé était protégée par des feuilles de plomb de 2 mm d'épaisseur sur les murs et une plaque de plomb de près de 130 mm d'épaisseur sur le sol. Le point médian du détecteur était placé à 2,2 m au-dessus du sol et à 2 m au-dessus de la chaise longue précédemment utilisée pour le comptage (voir la photographie 32). Le seuil de détection de la radioactivité pour un temps de comptage de 2 min était de 7,3 kBq (197 nCi).

En avril 1988, quelque 600 personnes avaient été contrôlées au moyen de l'anthroporadiamètre de Goiânia. Il fallait deux ou trois personnes pour manier l'appareil, faire les mesures in vivo et effectuer les calculs sur place. En janvier, un laboratoire destiné à la mesure des niveaux de radioactivité des excréments est venu s'ajouter à la salle d'anthroporadiamétrie, avec trois personnes supplémentaires.

6.1.2. Résultats généraux

Au cours des quatre premières semaines qui ont suivi l'accident, tous les renseignements disponibles sur la contamination interne provenaient des mesures

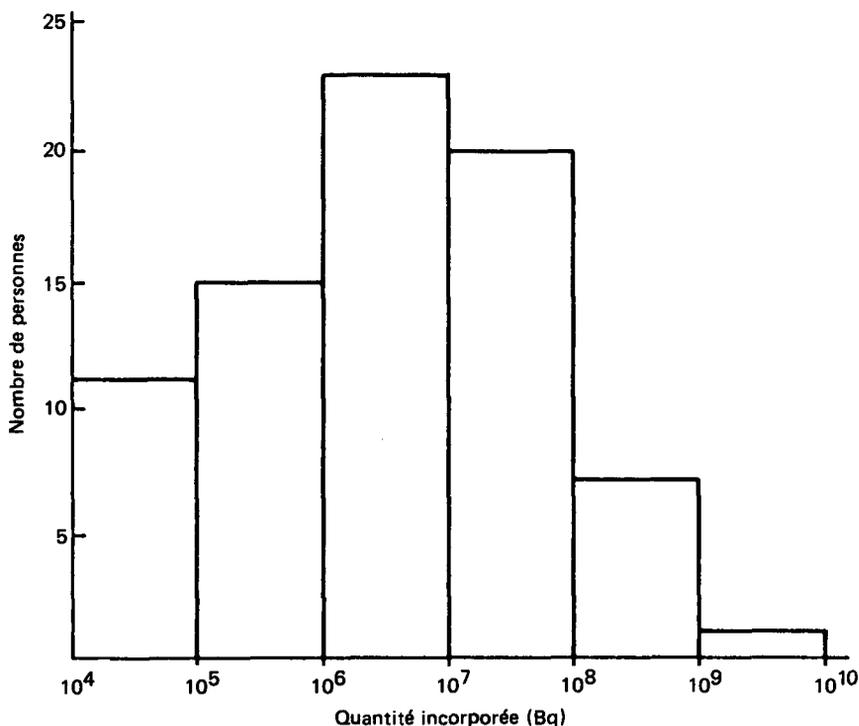


FIG. 13. Distribution de fréquence des quantités estimées de radioactivité incorporée (en becquerels) chez les personnes contaminées (histogramme).

faites sur les excréments à Rio de Janeiro. Elles étaient considérées comme les plus exactes qui puissent être obtenues à ce stade. Elles ont permis de distinguer les porteurs d'une contamination significative des autres personnes et d'estimer les engagements de dose. Plus de 4000 échantillons d'urines et de selles provenant de 80 personnes ont été analysés entre octobre 1987 et janvier 1988. La figure 13 est un histogramme montrant la distribution de fréquence des incorporations de césium 137. Les engagements de dose sur 70 ans dus à la contamination interne qui auraient été subis si aucune mesure de décontamination n'avait été prise apparaissent à la figure 14. L.F.2, l'enfant de six ans qui est décédée le 23 octobre, avait incorporé 1,0 GBq (27 mCi) de césium 137, la plus grande quantité enregistrée; la dose due à la contamination interne au moment du décès a été estimée à quelque 4 Gy.

Afin d'évaluer l'efficacité du bleu de Prusse, les quantités théoriques de matières radioactives contenues dans l'organisme ont été calculées à partir des résultats des mesures sur les échantillons d'urines et comparées aux chiffres obtenus par anthroporadiométrie. Un test statistique a montré qu'il n'y avait pas de différence sensible entre les deux, ce qui signifie:

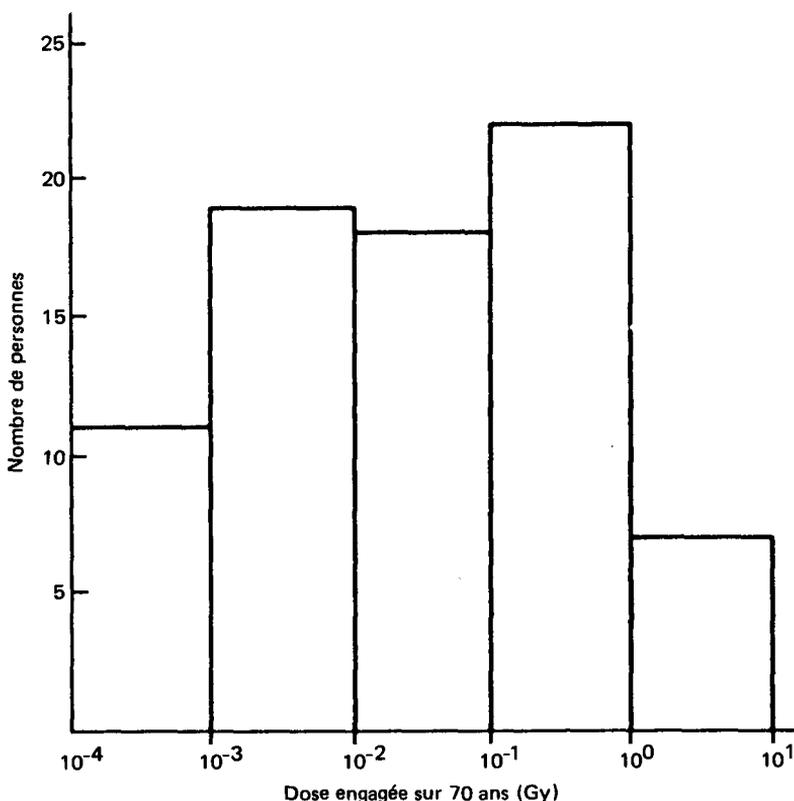


FIG. 14. Distribution de fréquence des doses engagées anticipées sur 70 ans, sans thérapie de décontamination des personnes contaminées (histogramme).

- a) que la diminution de la radioactivité dans les urines indiquée par les mesures sur les échantillons correspondait à une réelle baisse de la radioactivité corporelle;
- b) que la modélisation était appropriée et validée pour ce cas;
- c) que le bleu de Prusse favorisait l'élimination du césium 137 à condition que la dose administrée soit suffisamment forte (plus de $3 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$).

Une analyse détaillée des effets des différentes doses de bleu de Prusse sur la période biologique du césium 137 est en cours. Cependant, d'après les premiers résultats, qui n'ont pas encore été affinés, ce produit accélère l'élimination du césium 137. On peut le constater d'après la figure 11 qui donne les variations dans le temps de la quantité de matières radioactives présentes dans l'organisme chez un adulte qui a volontairement arrêté de prendre du bleu de Prusse. Après interruption du traitement, la période biologique, déterminée à partir des mesures effectuées sur une période de 120 jours, était d'environ 100 jours, ce qui correspond à la période biologique normale du césium 137 chez les adultes. Cette période biologique était

plus longue que celle qui avait été déterminée pendant la thérapie au bleu de Prusse. L'étape suivante de l'analyse des résultats consistera à faire l'évaluation complète de la diminution des engagements de dose obtenue chez les 62 patients à qui du bleu de Prusse a été administré.

En conclusion, pour faire face à l'accident, il a fallu employer les moyens suivants:

- a) Des effectifs suffisants ayant la formation et les compétences nécessaires pour être capables d'adapter les procédures établies. Le programme de formation financé par l'AIEA s'est révélé particulièrement utile à cet égard.
- b) Un laboratoire pour les mesures *in vitro* ayant deux entrées séparées, aménagement qui s'est révélé très utile pour protéger la santé du personnel et réduire le plus possible le risque de contamination mutuelle des échantillons.
- c) Un appareil de mesures *in vivo* avec détecteurs et accessoires électroniques de rechange qui ont pu être apportés à Goiânia pour monter l'anthroporadiamètre de fortune.
- d) Des modèles qui rapportent les résultats du biodosage aux incorporations, à la radioactivité corporelle et aux engagements de dose, et sont applicables pour différents radionucléides et différentes classes d'âge.

Un suivi des personnes contaminées est en cours. Il vise, dans un premier temps, à déterminer les doses engagées réelles chez les patients, compte tenu des effets du traitement au bleu de Prusse. Les résultats du programme de biodosage et d'anthroporadiamétrie en cours, que l'on a déjà mentionné, seront à cet égard fort utiles. Toutefois, un facteur de complication sera la variation des doses de bleu de Prusse administrées pendant le traitement de chaque patient. Des mesures *in vivo* sont régulièrement effectuées sur des échantillons de sang, des blessures et des organes chez 20 personnes pour déceler d'éventuelles distributions non homogènes du césium et sa rétention dans les tissus du corps. Le cas particulier d'une femme venant d'accoucher est à l'étude afin d'évaluer les mécanismes de rétention et de transfert pendant l'allaitement.

Il a fallu établir des recommandations concernant la radioprotection pour le renvoi chez eux des patients hospitalisés. Ces recommandations font l'objet de l'annexe II. Du fait que manifestement, d'après leur séjour à l'hôpital, les patients ne faisaient pas toujours ce qui leur était demandé, par exemple garder leurs excréments dans des bouteilles, les rédacteurs ont envisagé le pire pour établir ces recommandations.

6.2. EVALUATION DES DOSES PAR ANALYSE CYTOGENETIQUE

Des échantillons de sang ont été prélevés chez toutes les personnes que l'équipe médicale a jugées susceptibles d'avoir reçu des doses supérieures à 0,1 Gy (110 personnes en tout), puis envoyés au Laboratoire de cytogénétique de Rio de Janeiro pour

une estimation des doses. Ce laboratoire a été créé en 1983. Des procédures et méthodes normalisées, conformes à celles qui sont préconisées dans le numéro 260 de la Collection Rapports techniques de l'AIEA⁴, y sont appliquées. Durant la période d'urgence de l'accident, des quantités supplémentaires de produits chimiques indispensables (introuvables au Brésil) pour faire des cultures de sang ont été envoyées par le Laboratoire de radiogénétique et de mutagenèse chimique de l'Université de Leyde (Pays-Bas). Les autres produits courants étaient disponibles au laboratoire.

Les premiers échantillons de sang sont parvenus le 2 octobre, et plus de 25 échantillons destinés à l'analyse ont été reçus au cours de la première semaine. Les premiers échantillons analysés provenaient des dix patients fortement irradiés qui avaient été admis à l'Hôpital naval Marcilio Dias de Rio de Janeiro. Des échantillons de sang entier ont été mis en culture et 48 heures plus tard les lymphocytes ont été recueillis et préparés pour l'analyse chromosomique. Durant cette première phase, 100 cellules ont été analysées dans chaque cas afin de faire une évaluation préliminaire des doses. Les aberrations du type chromosomique, à savoir les chromosomes en anneau dicentriques et centriques, et les fragments acentriques, ont été dénombrées. Aucune courbe d'étalonnage pour le césium 137 n'étant disponible, on a utilisé celle qui existait pour le rayonnement gamma du cobalt 60 au débit de dose de $0,12 \text{ Gy} \cdot \text{min}^{-1}$ pour estimer les doses.

Les premiers résultats ont été disponibles trois jours après réception des échantillons de sang. Pour les personnes fortement irradiées, l'analyse de 100 cellules a été suffisante. Par contre, pour les expositions plus faibles (indiquées par une fréquence d'aberrations inférieure), 200 à 300 cellules ont été analysées. Les résultats ont rapidement été communiqués aux médecins, ce qui a été utile pour le traitement des malades. La distribution des doses estimées par analyse cytogénétique est présentée à la figure 15. Elle montre que les doses estimatives ont dépassé 1,0 Gy pour 21 personnes et 4,0 Gy pour huit personnes. Aucune dose estimative n'a dépassé 7,0 Gy.

Lorsque l'irradiation globale avait été uniforme, l'incidence des aberrations parmi les lymphocytes suivait une distribution de Poisson. Un écart par rapport à la distribution de Poisson (dispersion excessive) pouvait indiquer une irradiation non uniforme (partielle). Une analyse préliminaire des individus ayant reçu des doses estimées à 0,5 Gy ou plus a montré que six d'entre eux avaient subi une irradiation non uniforme. Les doses à l'organisme entier ont été estimées à 0,5 Gy, 0,6 Gy, 0,7 Gy, 1,3 Gy, 2,7 Gy et 4,5 Gy. Bien que plusieurs des autres individus ayant reçu des doses estimatives élevées aient pu subir une irradiation non uniforme (différentes

⁴ AGENCE INTERNATIONALE DE L'ENERGIE ATOMIQUE, Biological Dosimetry: Chromosomal Aberration Analysis for Dose Assessment, Collection Rapports techniques n° 260, AIEA, Vienne (1986).

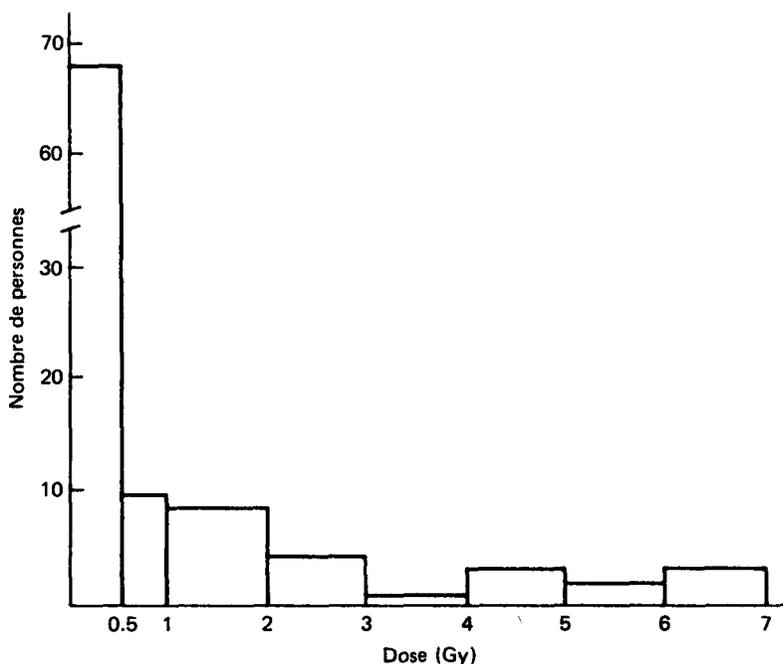


FIG. 15. Distribution de fréquence des doses reçues par les personnes contaminées — Estimation par analyse cytogénétique (histogramme).

parties du corps recevant des doses différentes), la résolution de l'analyse de Poisson n'est pas assez sensible pour le faire apparaître.

Des échantillons de sang ont également été envoyés dans plusieurs pays pour analyse cytogénétique. Les estimations des doses qui ont été obtenues étaient inférieures aux précédentes estimations. Cette discordance n'a rien de surprenant, car des facteurs tels que le démarrage différé des cultures de lymphocytes (c'est-à-dire la mort de cellules fortement irradiées pendant l'interphase), des critères de dénombrement différents et l'utilisation de courbes d'étalonnage différentes (irradiation aiguë ou chronique) peuvent influencer l'estimation des doses. La conclusion est que les techniques cytogénétiques ont été très utiles pour estimer les doses de rayonnement reçues.

Six personnes exposées ont été suivies pour déterminer la fréquence d'apparition des aberrations chez les lymphocytes à différents moments après l'accident. Trois scénarios différents ont été observés, à savoir:

- a) dans deux cas, la fréquence d'apparition des aberrations est restée constante jusqu'à un mois après l'accident, puis a diminué pour s'établir trois mois plus tard à 30% environ de la fréquence initiale;
- b) dans deux cas, diminution progressive de 20% environ tous les trois mois;

c) *dans le cas de deux personnes parmi les plus gravement contaminées intérieurement, augmentation de la fréquence d'apparition des aberrations (de 50 et 100%) sur une période de trois mois.*

Les études de suivi se poursuivront pendant encore cinq ans pour évaluer la fréquence d'apparition des aberrations aussi bien stables (translocations) qu'instables (chromosomes en anneau dicentriques et centriques) chez 15 personnes.

6.3. DOSIMETRIE EXTERNE

Durant la phase immédiatement postérieure à un accident radiologique, les estimations de doses fondées sur les débits de dose ambiants et sur la reconstitution de l'accident fournissent souvent des renseignements utiles pour le tri initial des patients. Dès que l'accident de Goiânia a été découvert, il est apparu clairement qu'il serait très difficile de faire des estimations de doses par suite de la conjugaison complexe d'une contamination et d'une irradiation externe, celle-ci ayant une géométrie compliquée et les facteurs temps étant dans la plupart des cas inconnus. Toutefois, quelques évaluations approximatives ont été faites aux fins du dépistage, ainsi que des évaluations de doses plus précises dans quatre cas relativement simples, c'est-à-dire pour les deux personnes (G.S. et M.F. 1) qui ont porté les restes du barillet porte-source en autobus à la Vigilância Sanitária, pour le docteur P.M. de la Vigilância Sanitária et pour E.F, qui avait été extérieurement irradié par le fragment de la source qu'il portait dans la poche de son pantalon. Même dans ces cas-là, les doses étaient estimées sous réserve d'incertitudes significatives.

Par la suite, on a cherché à utiliser les rapports des levés radiologiques des débits de dose et les facteurs d'occupation établis sur la base des renseignements plus détaillés fournis par les patients. Par suite des difficultés que pose la reconstitution des divers scénarios, ces évaluations ne sont pas encore terminées. Parallèlement, on tente actuellement, pour certaines des personnes exposées, d'appliquer des techniques plus perfectionnées de détermination des doses. Ainsi, une technique par résonance électronique de spin est employée pour la dosimétrie sur les os et la dosimétrie par thermoluminescence l'est pour certains objets qui pourraient donner une idée des doses reçues.

Partie III

CONTAMINATION DE L'ENVIRONNEMENT: EVALUATIONS ET ACTIONS CORRECTRICES

7. INTRODUCTION ET EXPOSE DES ACTIONS ENTREPRISES

8. EVALUATIONS

9. DECONTAMINATION

10. STOCKAGE DES DECHETS

7. INTRODUCTION ET EXPOSE DES ACTIONS ENTREPRISES

7.1. INTRODUCTION

Si l'on veut se préparer à une urgence radiologique, ou décrire un accident radiologique, il est commode de décomposer l'accident en plusieurs phases. Des travaux importants ont été faits sur ce point pour les accidents nucléaires potentiels⁵.

Les accidents radiologiques d'origine non nucléaire ont en général une ampleur bien moindre que les accidents nucléaires, de sorte que la planification et la décomposition possible en phases ont tendance à être moins complexes. En fait, dans la plupart des accidents de ce type l'action à entreprendre peut se diviser grosso modo en deux temps ou phases:

- a) La *phase initiale* au cours de laquelle une action immédiate s'impose
 - i) pour repérer les sources potentielles d'irradiation aiguë,
 - ii) pour maîtriser l'exposition.
- b) La *phase de rétablissement* qui n'exige plus d'action immédiate, et dont l'objectif est le retour à la normale.

Cela dit, plus l'accident est grave et complexe, moins la distinction entre ces deux phases est nette et l'on voit apparaître des sous-phases de durée plus ou moins longue correspondant aux différents aspects de l'accident.

Le présent chapitre donne un aperçu de l'action physique qui a été entreprise à la suite de l'accident de Goiânia entre le moment où il a été découvert, le 28 septembre 1987, et mars 1988. Certains aspects de cette action physique tels que les évaluations de l'environnement, la décontamination et le stockage des déchets sont examinés plus en détail dans les chapitres 8 à 10. On trouvera plus loin dans le présent chapitre la description des phases applicables à l'accident de Goiânia.

⁵ COMMISSION INTERNATIONALE DE PROTECTION RADIOLOGIQUE, Protection of the Public in the Event of Major Radiation Accidents: Principles for Planning, Publication 40, Pergamon Press, Oxford et New York (1984);
AGENCE INTERNATIONALE DE L'ENERGIE ATOMIQUE, Principes relatifs à l'établissement de niveaux d'intervention pour la protection du public dans le cas d'un accident nucléaire ou d'une urgence radiologique, Collection Sécurité n° 72, AIEA, Vienne (1985).

7.2. APERÇU

Les principaux foyers de contamination étaient les dépôts où le disque porte-source a été enlevé du barillet et où l'enveloppe de la source a été brisée, ainsi que les habitations des personnes les plus gravement touchées. Ces foyers se trouvaient à l'intérieur d'une zone de 1 km² environ dans les quartiers Aeroporto, Central et Ferroviario de Goiânia, mais il y avait quelques zones moins contaminées ailleurs. Il a fallu 11 semaines environ de travail intensif pour faire les levés radiologiques et procéder à la décontamination des sites fortement contaminés de cette zone, et trois autres mois pour s'occuper des sites où le niveau de contamination résiduel était faible.

Au cours de la phase initiale de l'intervention, les objectifs principaux étaient les suivants:

- a) repérer les principaux sites contaminés;
- b) faire évacuer les habitations où les niveaux de radioactivité dépassaient les niveaux d'intervention retenus;
- c) établir des contrôles de radioprotection autour de ces zones et, le cas échéant, en interdire l'accès;
- d) recenser les personnes qui avaient reçu des doses significatives ou étaient contaminées.

Le samedi 3 octobre, la plupart de ces objectifs avaient été atteints, les sept principaux foyers de contamination (voir la figure 16) ayant été repérés. Rétrospectivement, on pourrait considérer que la phase initiale de l'intervention était alors terminée, en ce sens que les principales sources de risques étaient maîtrisées. Cependant, comme on le verra plus tard, il était encore possible de découvrir d'autres zones moins gravement contaminées et de devoir établir des contrôles.

La semaine du 3 au 10 octobre pourrait être décrite comme la période de consolidation et de mise au point du programme général pour la phase du retour à la normale. Il s'agissait notamment d'évaluer les ressources nécessaires en personnel, en matériel et en articles jetables. Les difficultés qu'a posé le rassemblement de tous les articles nécessaires à 1 000 km de distance des grands centres radiologiques ont été considérables. A cet égard, le Groupe d'appui administratif et logistique (GALA), créé dans le cadre du Plan d'intervention d'Angra, a été très utile, notamment de par ses arrangements de transport avec l'armée de l'air brésilienne. Si le groupe GALA a constitué la base de l'appui logistique, l'accident a montré qu'il était nécessaire d'improviser et d'avoir sur place une autorité administrative qui soit en mesure de court-circuiter la bureaucratie.

Bien que des actions correctrices aient été menées durant la phase initiale, par exemple le coulage de ciment sur les restes de la source dans la cour de la Vigilância Sanitária, il a été décidé très tôt de n'entreprendre aucune opération importante de décontamination tant que des levés radiologiques complets n'auraient pas été effectués et qu'un site de stockage des déchets n'aurait pas été préparé. Auparavant, des

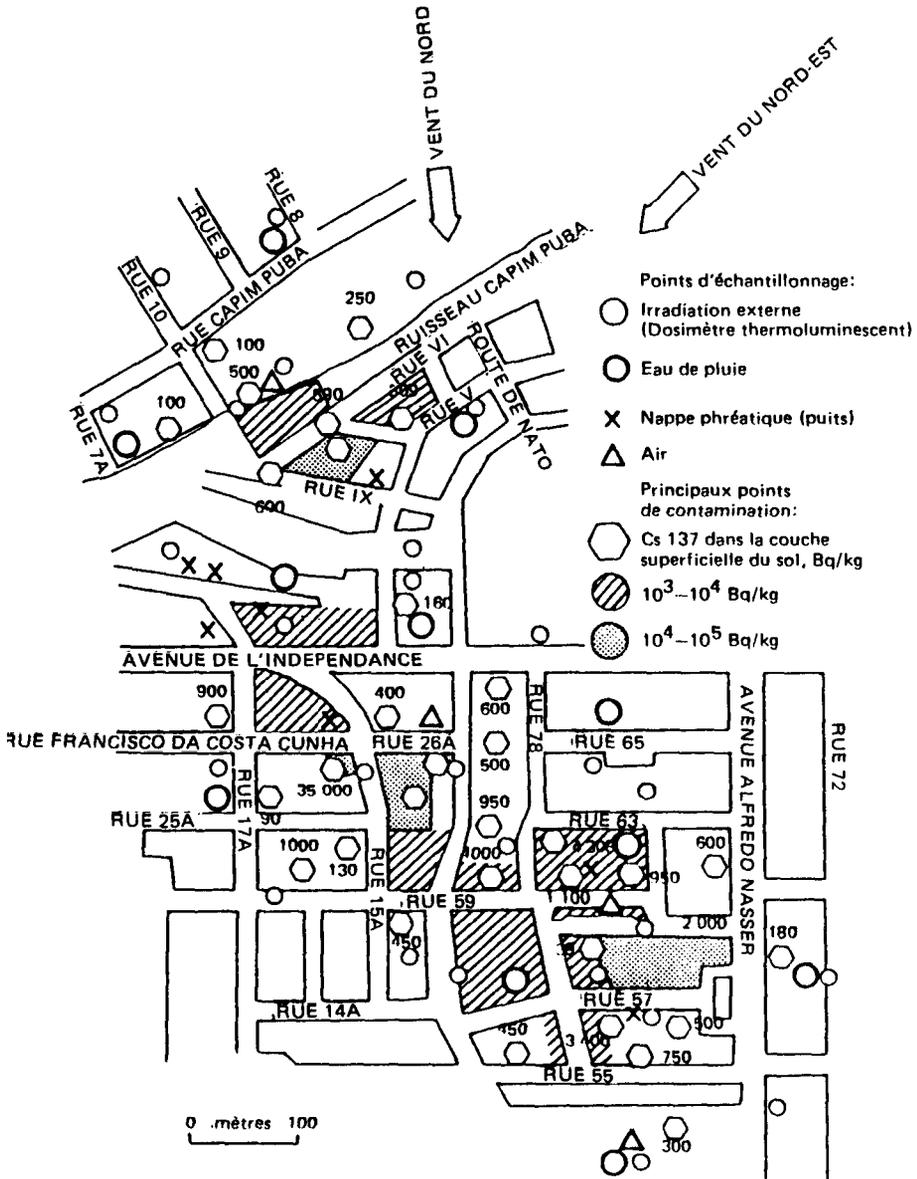


FIG. 16. Plan du quartier de l'Aeroporto à Goiânia montrant les principaux sites contaminés et les points d'échantillonnage.

procédures écrites, des critères d'intervention et des méthodes de contrôle de la qualité ont été établis. Le programme général de levés radiologiques comportait plusieurs éléments. Il fallait tout d'abord s'assurer qu'aucune contamination significative n'avait été oubliée. Deux procédés ont surtout été utilisés:

a) Un levé radiologique aérien de la ville a été fait les 7 et 8 octobre à l'aide de détecteurs héliportés. Il s'agissait là d'une adaptation du procédé de l'aérophoto-grammétrie.

b) Les premiers levés radiologiques du réseau routier ont été faits à l'aide des appareils d'abord héliportés qui avaient été transbordés sur un véhicule automobile. Parallèlement, une autre voiture équipée d'un cristal de NaI(Tl) d'environ 5 cm × 5 cm circulait dans d'autres secteurs de la ville pour repérer d'autres foyers éventuels de contamination. Des mesures plus précises ont été faites ultérieurement au moyen de détecteurs montés à l'arrière d'un break (voir la photographie 6).

En outre, les patients hospitalisés et les occupants d'habitations contaminées ont été interrogés sur les visites qu'ils avaient pu recevoir et sur leurs propres déplacements au cours de la période considérée pour obtenir des indications sur les voies possibles de transport de la contamination, ce qui a effectivement permis de déceler 42 autres sites moins contaminés tant à l'intérieur qu'à l'extérieur de la ville. Il ne faudrait pas sous-estimer l'importance de ces enquêtes, qui permettent d'orienter les opérations de contrôle radiologique et de tirer le meilleur parti possible des ressources disponibles. Il a fallu aussi faire une partie appréciable du travail à pied à l'aide de détecteurs à main pour contrôler correctement lieux publics et habitations, ainsi que certains objets comme les voitures. De nombreux autres objets ont été contrôlés et, notamment, dans le but essentiellement de rassurer le public, les billets de banque.

Au cours de la phase initiale, un programme de contrôle a également été mis en œuvre pour savoir si une contamination radioactive avait été transportée par l'eau d'une manière ou d'une autre, mais surtout pour s'assurer —bien que cela semblât peu probable— qu'aucune quantité significative n'avait atteint les approvisionnements en eau. En octobre, des échantillons ont été prélevés non pas de manière systématique, mais en fonction des demandes des autorités locales et des dires de la population. Un réseau d'échantillonnage a par la suite été préparé et mis en place dans le but d'évaluer toutes les voies de contamination de l'environnement. (Les voies de contamination par le césium apparaissent à la figure 17.)

A la suite de ces enquêtes et de ces levés radiologiques dans l'environnement, diverses actions correctrices sont apparues nécessaires: décontamination chimique, enlèvement de la couche superficielle du sol et ramassage des vêtements contaminés et des produits cultivés dans les jardins. On s'est vite aperçu que des volumes importants de déchets radioactifs allaient s'accumuler et, dès le 3 octobre, on envisageait les mesures à prendre pour y faire face. Il était évident que le rassemblement d'emballages appropriés allait causer des difficultés logistiques. Les spécifications dépendaient dans une certaine mesure du site de stockage, des moyens de transport

et des prescriptions réglementaires. Comme on pouvait s'y attendre, l'incident a provoqué chez le public une réaction de rejet vis-à-vis de tout ce qui avait trait aux rayonnements, de sorte que le choix du site de stockage des déchets et la lenteur de la décision à ce sujet s'expliquent en grande partie par des considérations politiques. Tout site situé à Goiânia était exclu. Le 16 octobre, on a choisi un endroit situé à 20 km de la ville, en précisant toutefois qu'il ne s'agissait que d'un site de stockage provisoire.

Le choix de l'emplacement du site de stockage des déchets, l'établissement des plans et la construction ont pris plus de temps que prévu. L'essentiel des travaux de décontamination n'a pu commencer qu'à la mi-novembre. Dans l'intervalle, on s'est borné essentiellement à faire les préparatifs et à empêcher que la situation ne se dégrade. Les préparatifs ont consisté à :

- a) concevoir et construire des conteneurs pour les déchets;
- b) réunir le matériel lourd nécessaire pour les gros travaux de décontamination (excavateurs, chargeuses-pelleteuses, rétrochargeuses, etc.);
- c) mettre à jour les procédures d'exécution écrites;
- d) essayer les diverses techniques de décontamination;
- e) établir un calendrier.

Les quelques activités de décontamination qui ont eu lieu alors n'ont pas pour la plupart concerné les principaux foyers et ont surtout porté sur l'intérieur des habitations évacuées.

L'absence d'un site de stockage et l'accumulation des problèmes logistiques et politiques ont ralenti les opérations qui ont été relancées par les actions suivantes:

- a) le Président de la CNEN a décidé de prendre lui-même la direction des opérations à Goiânia, ce qui a permis de réduire le nombre des formalités dans le processus de prise de décision par les autorités locales et fédérales;
- b) le Président de la République s'est rendu à Goiânia;
- c) la date butoir pour la décontamination des principales zones a été fixée au 21 décembre pour permettre aux évacués et aux travailleurs de rentrer chez eux pour Noël.

A ce moment, les effectifs engagés comprenaient environ 250 cadres et techniciens et 300 auxiliaires et ouvriers des transports, des travaux publics, etc. D'importants travaux ont également été faits au siège et dans les instituts de la CNEN, à Rio de Janeiro et à São Paulo, qui ont fourni divers services d'analyse et de dosimétrie. La date butoir du 21 décembre a pu être respectée grâce aux efforts des équipes d'intervention qui ont travaillé, souvent dans des conditions météorologiques défavorables, en se relayant toutes les 12 heures.

Cela a marqué la fin de ce que l'on pourrait appeler les opérations d'endigement, en ce sens que la contamination restante ne présentait pas de risques significatifs à court terme. Avant cela, tout relâchement des systèmes de contrôle ou le risque très réel d'un ouragan aurait pu provoquer une nouvelle dispersion de la contamination. Cela dit, il a fallu aussi mener des actions correctrices dans les zones contami-

nées entourant les principaux foyers, où les niveaux de radioactivité n'étaient plus aussi élevés, qui pouvaient donc faire l'objet de levés radiologiques et dont on pouvait s'occuper. Pour ce faire, aucun matériel lourd n'était plus nécessaire; des opérations manuelles et des procédés chimiques ont suffi. Le temps pressait moins, de sorte que des procédures d'optimisation ont pu être mises au point et adoptées. Ces travaux ont repris après Noël et duré jusqu'en mars 1988.

A posteriori, les travaux se sont répartis, semble-t-il, entre trois tâches:

- a) maîtriser la situation;
- b) endiguer la contamination;
- c) entreprendre une action corrective.

D'un point de vue temporel, il y a eu chevauchement entre ces trois tâches et entre les deux grandes phases de l'accident. Ainsi, si la situation était maîtrisée sur les principaux sites dans les cinq jours de la phase initiale, on s'est aperçu ultérieurement qu'elle devait l'être aussi dans d'autres zones moins contaminées. Le suivi et l'information en retour sont aussi des tâches importantes qu'on oublie trop facilement. A cet égard, il y a lieu de souligner qu'il faut, aussitôt que possible après l'accident, établir un compte rendu des faits dont le souvenir a tendance à s'estomper. Si l'on veut tirer des leçons de l'expérience des accidents et, en retour, les mettre à profit pour mieux se préparer aux urgences, il faut tirer pleinement parti de chaque occasion.

7.3. CRITERES DE DOSE POUR L'ACTION

Pendant toute la durée de l'intervention, on a utilisé un certain nombre de critères de dose, d'où ont été dérivés des niveaux de référence pour l'action exprimés en valeurs de grandeurs mesurables. Ces niveaux sont examinés plus en détail dans les chapitres suivants, mais la philosophie qui les sous-tend et les critères de dose sont examinés ici.

7.3.1. Evacuation

Des recommandations sur les niveaux d'intervention pour la protection du public lors d'un accident nucléaire ou d'une urgence radiologique ont été faites tant par la CIPR que par l'AIEA (voir 7.1), et les rapports des deux organisations se recourent. Parmi les mesures de protection susceptibles d'être prises lors d'un accident radiologique, l'évacuation est celle qui entraîne le plus de perturbations et elle doit être décidée au cas par cas. Cela dit, les deux rapports susmentionnés indiquent que normalement l'évacuation ne sera pas envisagée à des niveaux de dose inférieurs à 50 mSv par an et qu'elle sera presque certainement ordonnée si les niveaux de dose sont supérieurs à 500 mSv par an.

Comme on l'explique au chapitre 4, la décision de faire évacuer les habitations a été prise par le physicien W.F., sur la base d'une limite de débit de dose de $2,5 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$ à 1 m du sol à l'intérieur des maisons dérivée de la limite de dose annuelle pour l'irradiation professionnelle. Ce chiffre était aussi fondé sur l'ancienne limite de dose pour les personnes du public de 5 mSv par an pour les expositions non accidentelles (prévues). Dans les circonstances où l'accident de Goiânia a été découvert et du fait qu'il était impossible de déterminer rapidement si une partie de la dose était due à une contamination interne, il ne pouvait être question d'avoir recours à une théorie compliquée pour prendre la décision. Au cours des quelques premiers jours de l'intervention, l'équipe de la CNEN a retenu ce critère dérivé d'une manière simple. Après une semaine environ, le critère a été assoupli et la limite de débit de dose portée à $10 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$. Ce nouveau chiffre était encore fondé sur une limite de dose de 5 mSv par an, mais plusieurs facteurs modifiants ont été pris en compte dans son calcul. Ces facteurs, dont la fourchette des valeurs (entre 0 et 1) figure entre parenthèses, étaient les suivants:

- a) le facteur d'occupation (0,30 à 0,75);
- b) le facteur de distribution géographique qui exprime la relation entre le débit de dose moyen et le débit de dose maximal (0,1 à 0,2);
- c) le facteur de distribution temporelle qui permet de tenir compte de la diminution de la radioactivité due, par exemple, au nettoyage et aux agents atmosphériques (0,1 à 0,4).

Dans chaque cas, la valeur la plus prudente (la plus élevée) a été retenue. Bien que des procédures détaillées aient été établies à l'époque en vue d'un système plus perfectionné d'actions et de critères fondé sur des niveaux de référence plus élevés, ces procédures n'ont jamais été mises en œuvre, car après l'accident de Goiânia la situation d'urgence n'a pas été officiellement déclarée. La conduite suivie a été largement influencée par des facteurs politiques et sociaux et par le refus de considérer l'accident comme une situation d'urgence susceptible d'être comparée d'une certaine façon à un accident nucléaire possible.

Les décideurs doivent savoir que l'adoption d'une valeur restrictive pour le niveau de référence déclenchant l'évacuation (5 mSv par an) pourrait entraîner une charge économique et sociale susceptible d'être aggravée par le recours, pour le calcul des niveaux de référence, à des facteurs pessimistes qui cumulent leurs effets.

7.3.2. Actions correctrices

Diverses actions correctrices ont été entreprises, telles que la décontamination des biens, le ramassage des vêtements contaminés, l'enlèvement de la couche du sol contaminée et l'imposition de restrictions sur les produits cultivés dans les jardins près des principaux foyers. Le critère adopté a été que la dose au groupe critique pendant la première année ne devait pas dépasser 5 mSv. Les niveaux de référence ont été calculés à partir de ce critère et, ultérieurement, les doses à long terme ont

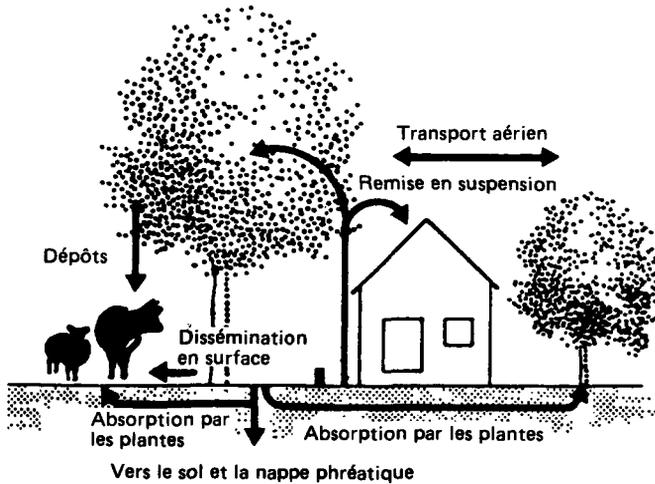


FIG. 17. Voies de contamination, pour le césium.

été définies à partir du critère selon lequel les doses devaient être inférieures à 1 mSv par an. On a constaté que le critère de 5 mSv était le facteur limitatif.

Il est apparu qu'il y avait plusieurs voies d'exposition possibles (voir la figure 17); les limites supérieures de la dose pendant la première année ont donc été fixées comme suit pour les principales voies d'exposition:

- a) Intérieur des habitations (irradiation externe): 1 mSv.
- b) Extérieur des habitations (voies partant du sol contaminé): 4 mSv, dont 3 mSv dus à l'irradiation externe et 1 mSv à la contamination interne, par exemple par ingestion de fruits et denrées contaminés.

La limite supérieure de la dose pour l'exposition à l'intérieur des habitations ne s'appliquait qu'à l'irradiation externe (due surtout à la contamination des toits), car on a estimé que, compte tenu du niveau de référence adopté pour la contamination de surface, la composante due à la contamination interne serait négligeable. Ce niveau de référence a été fixé à $37 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-2}$, c'est-à-dire au niveau fixé dans le règlement de base de la CNEN pour les zones non actives. Pour l'irradiation externe, on a supposé un facteur d'occupation de 0,5 (12 heures par jour), ce qui a donné un niveau de référence pour la décontamination de $0,5 \text{ } \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$ compte tenu du rayonnement naturel.

Là encore, les critères de dose comme les modèles retenus pour les niveaux de référence dérivés (voir les chapitres suivants) ont été définis dans le contexte de fortes pressions sociales et politiques. Il est à noter que les valeurs retenues s'appliquent mieux à des circonstances normales qu'aux conditions régnant immédiatement après un accident.

Sur la base d'une limite supérieure de 3 mSv pour l'irradiation externe par les voies partant du sol et d'un facteur d'occupation des jardins de 0,5 (12 heures par jour) et dans les hypothèses d'une source plane infinie et d'un débit de dose naturel de $0,2 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$, on a fixé le niveau de référence à $1,0 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$. Cette valeur correspond à une radioactivité de $430 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-2}$, soit $22,5 \text{ kBq} \cdot \text{kg}^{-1}$ dans les 15 mm de la couche superficielle du sol, où on a décelé la plus haute activité. Le niveau d'investigation a été fixé à $10^4 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$.

On a estimé à 1 mSv la valeur de l'équivalent de dose efficace engagé qui devait découler de l'utilisation des jardins au cours de la première année suivant l'accident, à ce niveau d'activité de la couche superficielle du sol. Cette estimation a été faite d'après des données particulières au site et un modèle du type de celui qui est décrit dans le numéro 57 de la Collection Sécurité de l'AIEA⁶. Les voies de contamination interne prises en compte (en négligeant l'inhalation de matières remises en suspension) ont été l'ingestion de fruits, de viande de volaille, d'œufs, de viande de porc et de légumes verts contaminés. Cependant, pour les fruits déjà contaminés par le dépôt initial après l'accident, un niveau dérivé de $650 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ a été fixé pour l'élagage des arbres et le ramassage des fruits, conformément aux normes brésiliennes.

⁶ AGENCE INTERNATIONALE DE L'ENERGIE ATOMIQUE, Generic Models and Parameters for Assessing the Environmental Transfer of Radionuclides from Routine Releases: Exposures of Critical Groups, Collection Sécurité n° 57, AIEA, Vienne (1982).

8. EVALUATIONS

8.1. DISPERSION DE LA CONTAMINATION

Au cours de la phase initiale de l'intervention, l'équipe a pu dresser un tableau général des sites et de l'ampleur de la contamination. Elle a repéré sept foyers principaux de contamination essentiellement situés dans les banlieues urbanisées où se trouvent un grand nombre de petits potagers et vergers, ainsi que quelques poulaillers. Toutes les maisons ont l'eau courante et le tout-à-l'égout. Il existe quelques puits artésiens qui ne sont toutefois utilisés que durant les périodes de sécheresse prolongées. Les eaux usées comme les eaux de pluie se déversent dans le Capim Puba, affluent du Meia Ponte, qui traverse Goiânia du sud-ouest au nord-est (voir la figure 18).

Selon les statistiques météorologiques fournies par le Ministère brésilien de l'agriculture, 25,2 mm de pluie sont tombés à Goiânia le 21 septembre et 18,4 mm le 23 septembre; après une interruption de quelques jours, les précipitations ont repris les 27 et 28 septembre, où on a enregistré 8,7 mm. Ces précipitations ont été précédées par des vents et des températures très élevées. Durant les 15 jours avant la découverte de l'accident, la température moyenne a été de 26,4°C.

Le chlorure de césium étant extrêmement soluble, les précipitations ont favorisé sa dispersion dans l'environnement. On avait pensé au départ que les fortes pluies auraient fait pénétrer la contamination dans le sol argileux qui l'aurait fixée ou qu'elles l'auraient entraînée par ruissellement. Tel ne fut pas le cas. En fait, la terre a séché sous l'effet des températures élevées et le vent a remis en suspension la contamination déposée et l'a dispersée, ce qui a eu des répercussions d'une ampleur inattendue. Le débit de dose mesuré à l'intérieur de certaines maisons était essentiellement dû à la contamination déposée sur les toits, de sorte que les tuiles ont dû être enlevées.

Outre ces phénomènes naturels, il faut citer le transport des matières radioactives par les personnes qui ont traversé les zones contaminées, et des cas de dépôt d'ordures ménagères contaminées dans des jardins en friche.

8.2. LEVES RADIOLOGIQUES

8.2.1. Levé aérien

Au cours de la phase initiale de l'intervention, il a fallu s'assurer que tous les principaux foyers de contamination avaient bien été repérés. Pour ce faire, un levé aérien de Goiânia a été fait par hélicoptère les 7 et 8 octobre. Un spectromètre gamma portatif alimenté par des piles et équipé de détecteurs au NaI(Tl) d'un volume

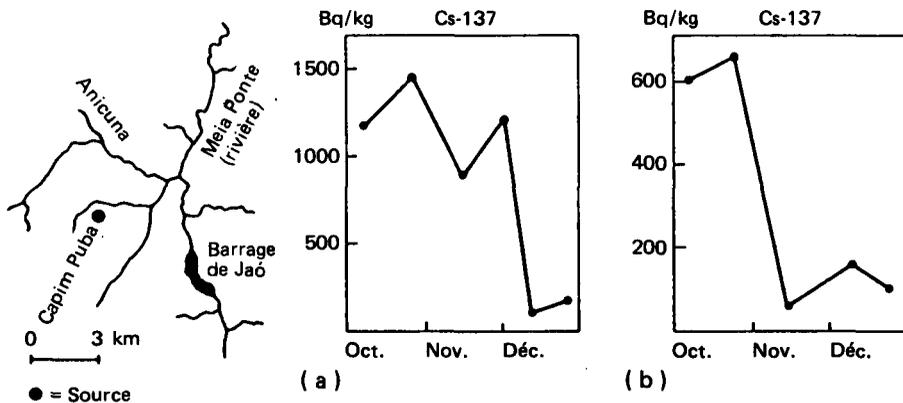


FIG. 18. Carte hydrographique de Goiânia et graphique des concentrations de césium 137 dans des échantillons de sédiments prélevés a) dans l'Anicuna; b) au barrage de Jaó.

total de 840 cm^3 a été utilisé. Après essais au sol, un test en vol a été effectué loin des sites contaminés pour mesurer le rayonnement ambiant. Des essais ont aussi été faits pour vérifier que les tourbillons provoqués par le rotor de l'hélicoptère n'entraînaient pas une remise en suspension et une nouvelle dispersion non négligeables de la contamination. L'hélicoptère volait à une altitude de 40 m et couvrait efficacement des cercles de 80 m de rayon. La vitesse par rapport au sol était comprise entre $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ et $70 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. En deux jours, toutes les zones urbaines de Goiânia ont été survolées (67 km^2 environ), ce qui a permis de vérifier qu'aucun site fortement contaminé n'avait été oublié et de repérer un endroit où le débit de dose était de $21 \text{ mSv} \cdot \text{h}^{-1}$ à 1 m (la figure 19 est un exemple d'enregistrement analogique obtenu en survolant une zone contaminée).

8.2.2. Levé par véhicule automobile

Il était encore possible que l'hélicoptère ait manqué des sites de moindre contamination, en particulier dans les zones voisines des sites fortement contaminés où les valeurs du rayonnement ambiant lues sur le détecteur étaient élevées. Il fallait donc adopter une méthode complémentaire de contrôle qui permette de couvrir de vastes superficies et ne demande pas autant de personnel que l'emploi d'appareils à main. Pour ce faire, on a d'abord transbordé les détecteurs de l'hélicoptère sur une automobile, avec laquelle on a parcouru les zones attenantes aux principaux foyers de contamination, ainsi que plusieurs autres quartiers de la ville. En outre, un détecteur au NaI(Tl) a été installé sur une autre automobile afin de mesurer la radioactivité le long des cours d'eau et de repérer éventuellement de nouveaux foyers de contamination dans d'autres quartiers de la ville. Ultérieurement, un ensemble de détecteurs

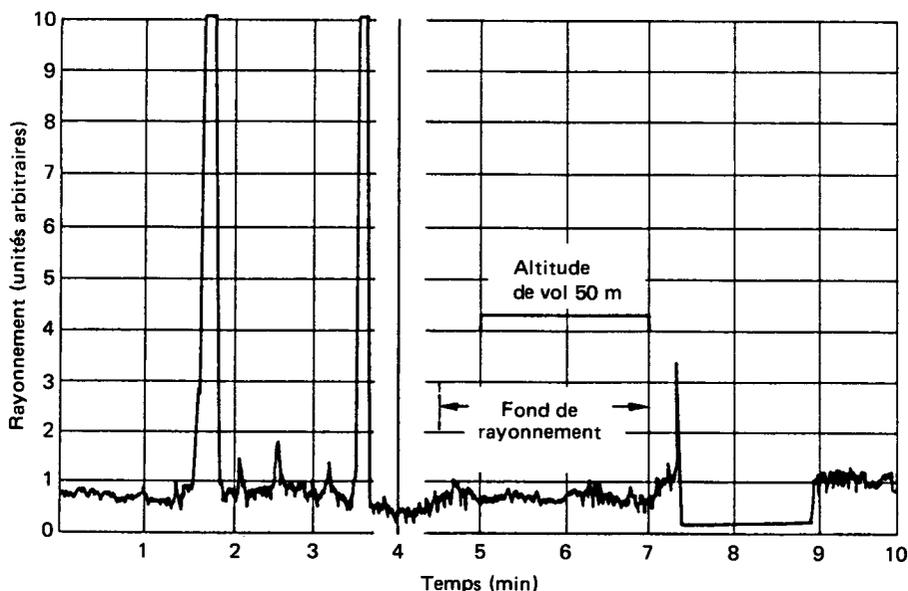


FIG. 19. Enregistrement d'un levé radiologique aérien. La mesure du fond de rayonnement a été effectuée à une altitude de 50 m, alors que l'hélicoptère survolait une région dégagée située en dehors de la zone contaminée de Goiânia. Les pointes correspondent à des anomalies radiométriques au-dessus des zones contaminées.

a été monté à l'arrière d'un break (voir la photographie 6). On a eu recours à des détecteurs au NaI(Tl) de 100 mm × 100 mm et du type à tube-compteur Geiger-Müller. L'un des problèmes rencontrés a été la sensibilité de l'électronique aux écarts de température, de sorte qu'il a fallu utiliser une voiture climatisée. Le programme de mesures radiologiques a comporté deux phases. Au cours de la première, qui a duré jusqu'à décembre, on a procédé à ces mesures essentiellement dans la zone extérieure aux principaux foyers de contamination. Après Noël, on a fait une seconde série de mesures lorsque ces foyers eurent été décontaminés.

8.2.3. Emploi d'appareils à main

Des mesures plus précises des débits de dose et de la contamination ont été faites à proximité des principaux foyers.

La figure 16, qui illustre ce vaste programme de mesures, donne une idée des débits de dose et bandes de contamination autour des principaux foyers. Des valeurs des débits de dose plus détaillées sont indiquées sur la figure 20 (pour la maison et le dépôt de ferraille où l'enveloppe de la source a été brisée) ainsi que sur les figures 21 et 22. On trouvera à la figure 23 l'exemple d'un site moins contaminé où la contamination a été apportée par les habitants et les visiteurs.



Bâtiment démoli

0 mètres 12

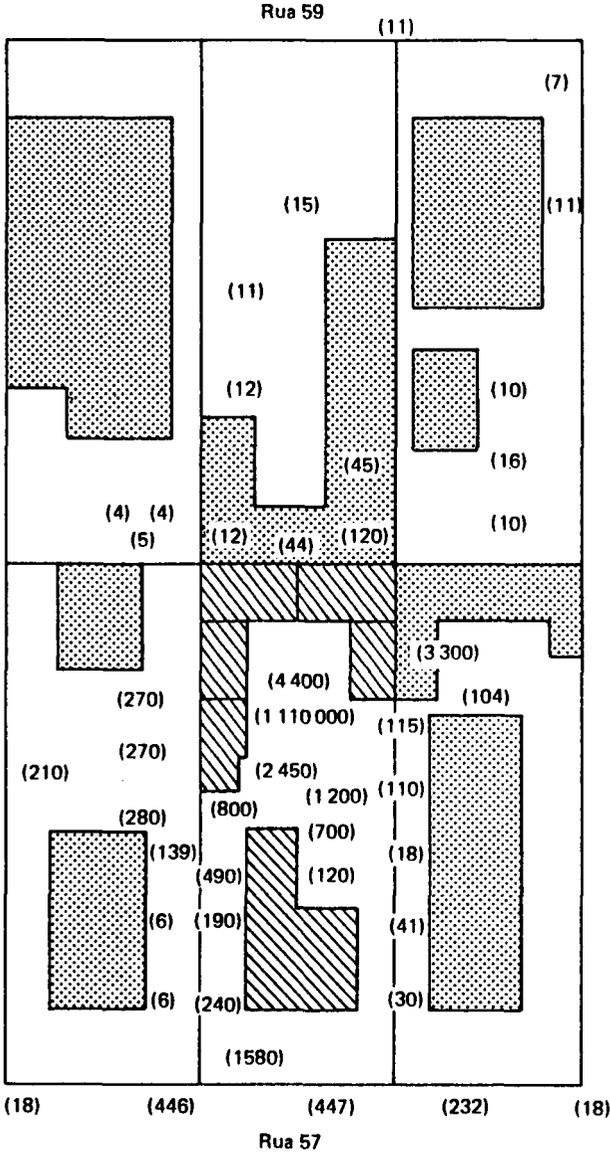


FIG. 20. Débits de dose (en $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$) autour de la maison de R.A. dans la Rua 57.

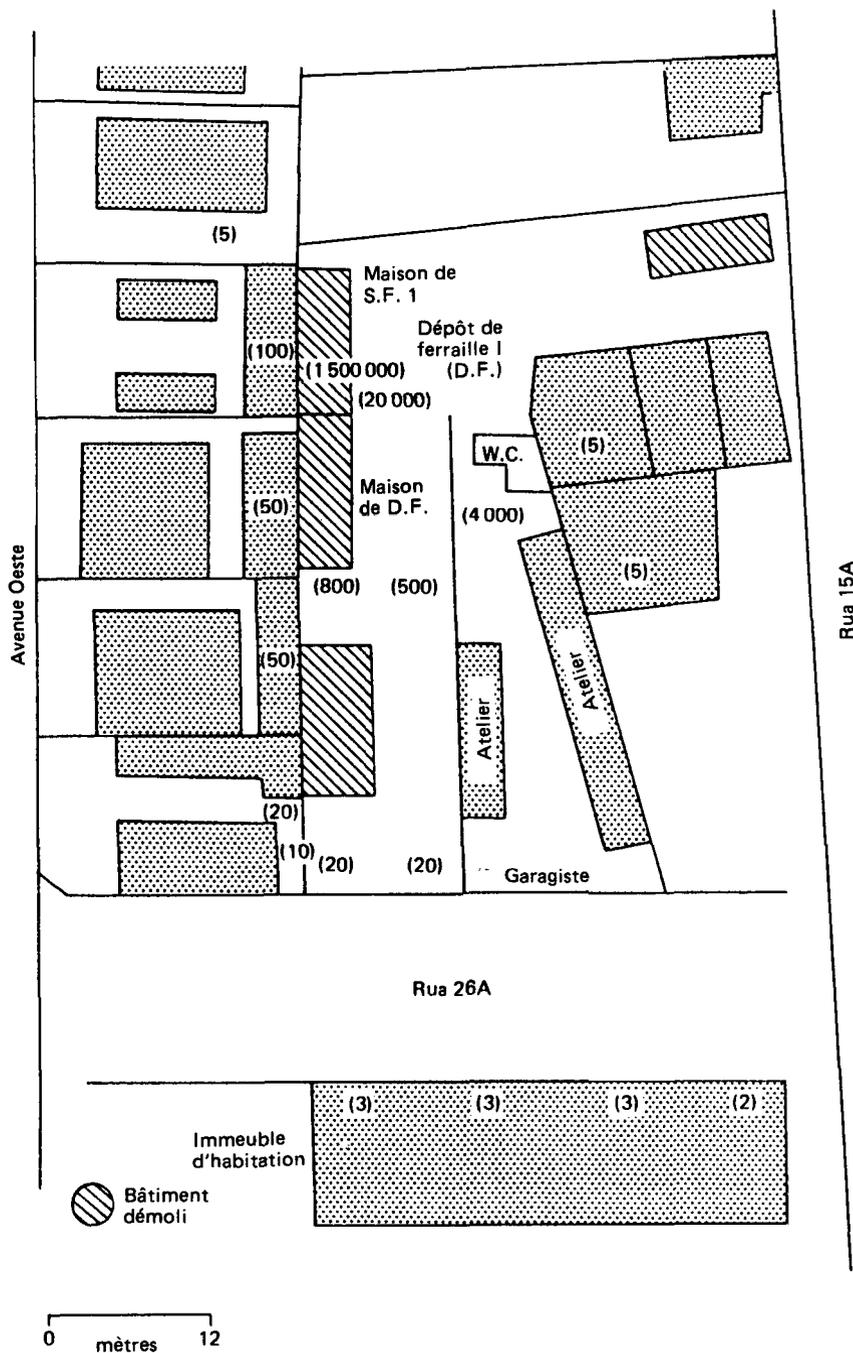


FIG. 21. Débits de dose (en $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$) autour de la maison de D.F. dans la Rua 15 A.

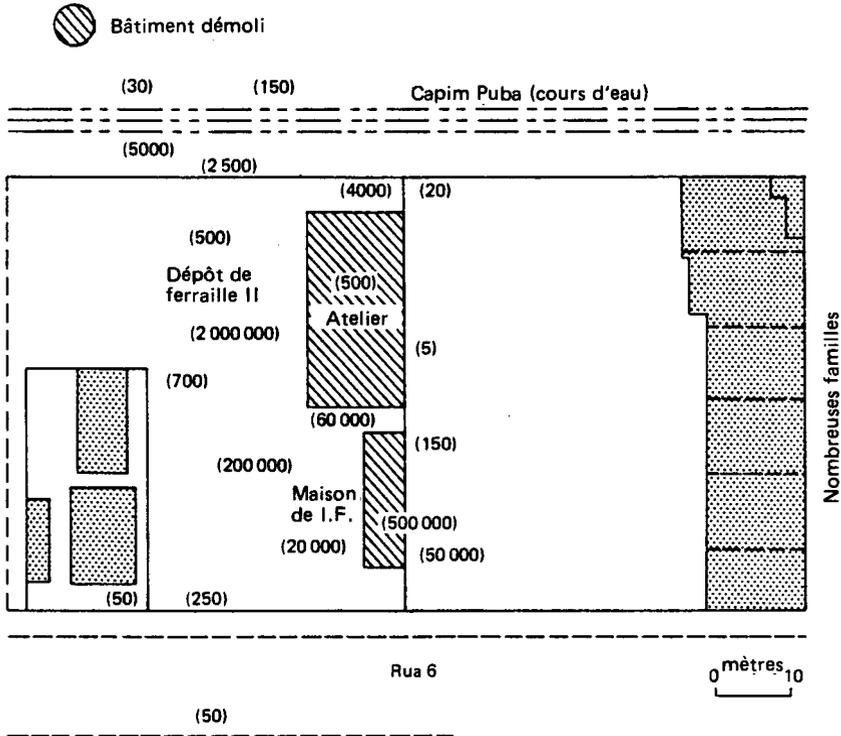


FIG. 22. Débits de dose (en $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$) autour de la maison de I.F. dans la Rua 6.

8.3. SURVEILLANCE DE L'ENVIRONNEMENT

Dans le but de quantifier le césium dispersé dans l'environnement, plus de 1300 mesures de l'activité du césium 137 contenu dans le sol, les végétaux, l'eau et l'air ont été faites. On s'est intéressé surtout aux zones voisines (dans un rayon de 50 m environ) des principaux foyers. Au départ, on a utilisé un analyseur multicanal équipé d'un détecteur à cristal de NaI de 5 cm \times 5 cm et installé dans un laboratoire spécial aménagé à Goiânia à la mi-octobre. On a constaté toutefois qu'un analyseur monocanal muni d'un détecteur à cristal de NaI de 7,5 cm \times 7,5 cm était suffisamment sensible pour des temps de comptage courts (10 min), le césium 137 étant le seul radionucléide présent dans les échantillons. (On pouvait donc utiliser des appareils beaucoup plus simples que dans les cas où il y a contamination par de nombreux radionucléides.)

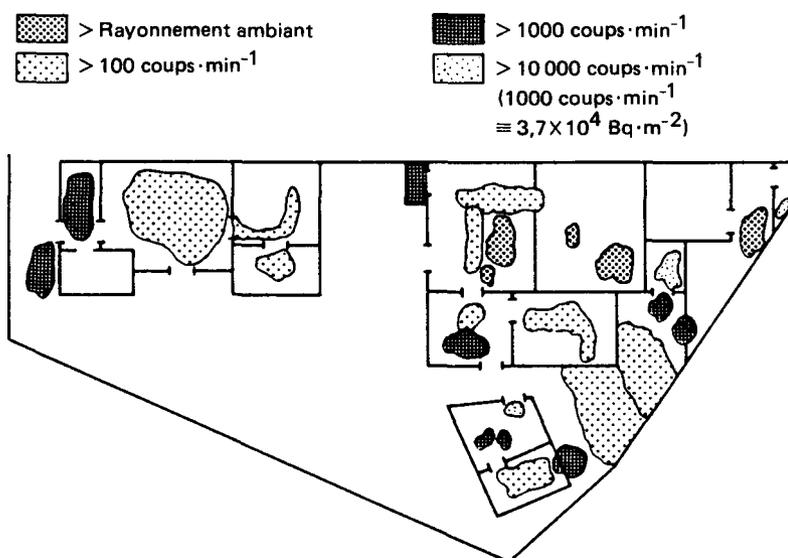


FIG. 23. Débits de dose (en $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$) dans une zone d'habitation contaminée par les résidents et les visiteurs.

8.3.1. Sol

La distribution des niveaux de radioactivité dans quelque 400 échantillons de sol apparaît à la figure 16. Ces niveaux, compris entre 10^2 et 10^5 $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$, diminuaient à mesure que l'on s'éloignait des principaux foyers. Ils étaient influencés par le régime des vents et accusaient les effets d'une remise en suspension et d'une nouvelle dispersion. Les profils pédologiques ont montré plus tard que, quelle que fût la radioactivité à la surface, les 15 mm de la couche superficielle du sol gardaient en moyenne 60% du césium (voir la photographie 19).

8.3.2. Végétaux

Deux cent soixante-trois échantillons de végétaux (feuilles, branches et fruits) ont été prélevés aux mêmes endroits que les échantillons de sol, puis analysés. La radioactivité des feuilles était très proche de celle du sol, tant en niveau qu'en distribution, puisqu'elle devait être due au dépôt de poussières, cause confirmée par le fait qu'un lavage réduisait la radioactivité de 50%.

8.3.3. Bassin de la Meia Ponte

La surveillance du bassin hydrographique a commencé pendant les premiers jours d'octobre et a porté sur l'eau de surface, les matières en suspension, les

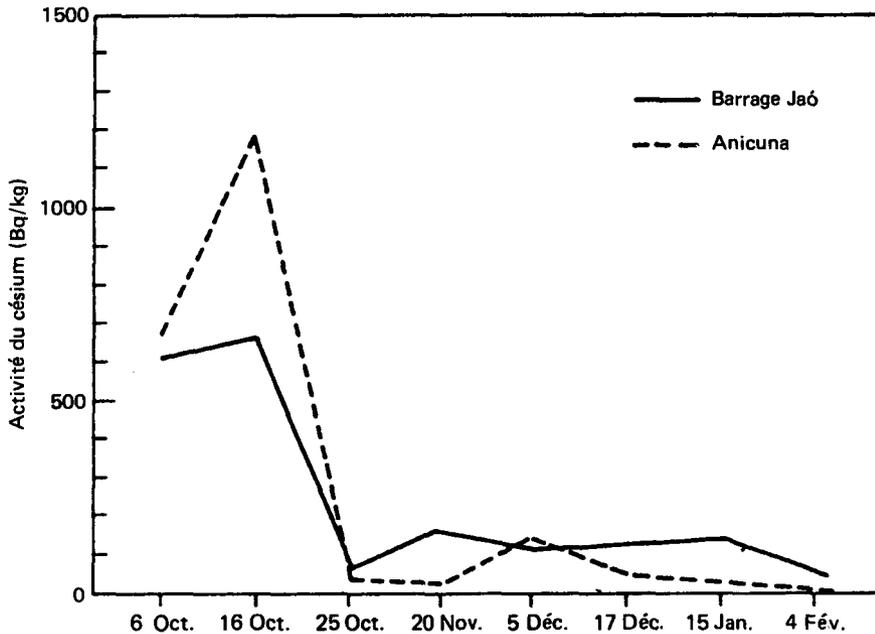


FIG. 24. Variation dans le temps de la radioactivité du césium 137 présent dans des sédiments provenant de l'Anicuna et du barrage de Jaó.

sédiments et les poissons, ainsi que sur le lit des cours d'eau. Cette surveillance s'est appliquée en particulier au Capim Puba, affluent de la Meia Ponte, qui reçoit les eaux pluviales et les eaux usées provenant de la zone où se trouvent les trois sites les plus contaminés. En outre, des mesures ont été faites dans le réseau d'assainissement du district. Aucune radioactivité significative n'a été constatée. (Voir la figure 24.)

8.3.4. Eau destinée à la distribution publique

Goiânia est approvisionnée par une station de traitement qui reçoit l'eau d'un affluent de la Meia Ponte qui s'y jette en amont du confluent avec le Capim Puba. Après traitement, l'eau est amenée dans des réservoirs situés au vent par rapport à la zone contaminée. Il n'est donc pas surprenant que les niveaux de radioactivité des échantillons d'eau provenant de la station de traitement et des réservoirs, aussi bien avant qu'après le traitement, aient été inférieurs au minimum décelable ($1 \text{ Bq} \cdot \text{L}^{-1}$). Quoiqu'il en soit, le résultat de ces mesures a beaucoup contribué à apaiser les craintes du public et à en conserver la confiance au début des opérations.

TABLEAU IV. ACTIVITE DES AEROSOLS D'ECHANTILLONS PRELEVES A 50 m DES PRINCIPAUX FOYERS DE CONTAMINATION LORS DE L'ENLEVEMENT DES DECHETS RADIOACTIFS

Point	Radioactivité des aérosols due au césium 137 dans des échantillons prélevés à différents moments en 1987 (mBq·m ⁻³)				
	Nov. sem 2	Nov. sem 3	Nov. sem 4	Dec. sem 1	Dec. sem 2
1	0,9 ± 0,3	3,8 ± 0,4	<0,4	0,33 ± 0,11	0,3 ± 0,07
2	1,0 ± 0,4	75 ± 4	29 ± 2	4,4 ± 0,3	ND ^a
3	0,7 ± 0,3	<0,5	2,2 ± 0,3	2,6 ± 0,2	ND ^a

^a ND: Non disponible.

8.3.5. Nappe phréatique

Bien que Goiânia dispose d'un réseau de distribution publique, de nombreuses maisons sont encore alimentées par des puits, surtout pendant les périodes de sécheresse. Trente puits situés autour des principaux sites contaminés ont été inspectés. Les niveaux de radioactivité ne dépassaient le seuil de détection (1,5 Bq·L⁻¹) que dans les puits situés à proximité des principaux foyers. Le niveau le plus élevé, c'est-à-dire 30 Bq·L⁻¹, a été mesuré dans le puits désaffecté d'une habitation.

8.3.6. Eau de pluie

Pour évaluer le dépôt total, 11 stations de collecte des eaux de pluie ont été établies dans le quartier de l'Aeroporto. On n'a pas décelé d'activité du césium 137 supérieure au niveau de la limite de détection (150 Bq·L⁻¹).

8.3.7. Air

Cinq échantillonneurs d'air à débit élevé (58 m³·h⁻¹) ont été installés à proximité des principaux sites contaminés (voir la figure 16) et un échantillonneur témoin a été placé dans un village éloigné. Les résultats des prélèvements hebdomadaires (voir le tableau IV) indiquent que les valeurs maximales ont été atteintes au cours des troisième et quatrième semaines de novembre à cause des opérations de décontamination, mais qu'en général, les niveaux étaient inférieurs d'au moins un ordre de grandeur.

8.4. APPAREILS DE MESURES RADIOLOGIQUES

On a utilisé des appareils de nombreux types qui avaient été rassemblés par un coordonnateur au siège de la CNEN et fournis par la CNEN et ses divers instituts (IRD, IEN, IPEN), FURNAS, NUCLEBRAS, des universités et centres d'études, et au titre de l'aide étrangère. Au total, 55 débitmètres de dose, 23 contaminamètres et 450 électromètres à fibre de quartz (stylos dosimètres) ont été utilisés.

Comme on pouvait s'y attendre, compte tenu du nombre élevé de détecteurs de provenances aussi diverses, certains d'entre eux sont arrivés sans compte rendu d'étalonnage ni manuel d'instruction (nécessaires aussi bien pour l'utilisation que pour les réparations). L'emploi intensif de ces appareils sur le terrain, quelquefois par des personnes n'ayant pas une grande expérience de leur maniement, a évidemment exigé une maintenance continue. Pour cette raison, au cours de la phase initiale un laboratoire d'électronique et d'étalonnage a été établi à Goiânia. Les types d'appareils utilisés sont indiqués à l'annexe I, ainsi que le jugement formulé par les spécialistes sur leur utilité.

9. DECONTAMINATION

La décontamination a certainement été l'opération qui a demandé le plus de ressources, car elle a occupé 550 personnes à Goiânia même. Le présent chapitre en expose les principaux aspects.

Une contamination significative a été décelée dans 85 maisons dont 41 ont été évacuées. Les habitations situées à l'écart des principaux foyers de contamination ont été traitées les premières. D'abord, on choisissait un endroit non contaminé à l'extérieur de la maison, d'où il était facile de contrôler les objets situés à l'intérieur. Ensuite, le site était recouvert d'une feuille de plastique et tous les objets mobiles étaient sortis, puis contrôlés à l'aide d'un contaminamètre de surface. Les vêtements l'étaient au moyen d'un scintillomètre (NaI) qui était protégé lorsque les débits de dose ambiants étaient élevés. Les objets déclarés non contaminés étaient emballés dans du plastique. Les autres étaient convenablement décontaminés ou classés comme déchets.

Les techniques utilisées variaient selon les objets. La décision de décontaminer ou de classer comme déchet était prise en fonction de la facilité de la décontamination, sauf pour les biens ayant une valeur particulière, tels que les bijoux, ou pour les objets personnels à valeur sentimentale. Il était démoralisant pour les habitants et les techniciens de voir jouets, photographies et autres objets ayant une valeur sentimentale évidente, entassés dans une cour avant d'être enlevés. Il s'agit là d'un aspect psychologique de l'accident qu'il ne faut pas négliger.

Une fois la maison vidée de son contenu, des aspirateurs équipés de filtres à haute efficacité étaient utilisés pour nettoyer toutes les surfaces. Murs, fenêtres, sols, lavabos et réservoirs à eau étaient contrôlés. Les surfaces peintes étaient parfois décapées. Les sols, en général de céramique rouge, étaient décontaminés à l'aide d'un mélange d'acide et de bleu de Prusse. (Voir l'annexe IV pour plus de détails.)

La contamination des toits due à la dispersion atmosphérique a parfois sensiblement influé sur les niveaux de radioactivité à l'intérieur des habitations. L'intérieur des toits était dans ces cas nettoyé à l'aide d'un aspirateur et l'extérieur lavé au jet d'eau à haute pression. Cette méthode n'a guère été efficace, puisque les débits de dose n'ont diminué que de 20% environ et les toits de deux maisons ont dû être enlevés.

S'agissant des jardins, l'égavage des arbres et l'élimination des fruits ont donné de bons résultats.

Quarante-cinq lieux publics, trottoirs, squares, magasins et bars, ont été décontaminés. La contamination y était en général moindre que dans les locaux d'habitation et affectait certains endroits limités sur des surfaces artificielles, tels que les trottoirs et les murs. Une cinquantaine de véhicules ont également été touchés. (Voir la photographie 17.)

Le gros travail de décontamination a commencé à la mi-novembre avec la démolition et l'enlèvement des décombres de sept maisons trop contaminées pour être nettoyées. La plus grande partie de la terre des jardins et cours fermés a également été enlevée après avoir fait l'objet d'un contrôle radiologique. (Voir les photographies 7 à 19.)

Le site le plus contaminé était la maison où l'enveloppe de la source avait été brisée (figure 20). Il a été réservé pour la dernière opération de décontamination qui était également la plus dangereuse. (Voir les photographies 13 et 14.) Les débits d'exposition y étaient très élevés, ce qui limitait considérablement la durée du temps de travail autorisé sur les points chauds. Le travail a exigé une planification rigoureuse. Plus de 90% du sol le plus contaminé l'était en surface (avec des débits de dose atteignant $1,5 \text{ Sv} \cdot \text{h}^{-1}$) et l'essentiel du travail a dû se faire sous des pluies violentes. (Voir la photographie 21.) De ce fait, il a été particulièrement difficile, pendant l'enlèvement mécanique de la boue contaminée et sa mise en conteneurs, de respecter la limite de dose quotidienne fixée à 1,5 mSv pour les travailleurs.

Après démolition, les gravats et la terre ont été enlevés jusqu'à ce que les critères fixés aient été atteints. Le site a été alors recouvert de béton ou d'une couche de sol frais compacté.

Après Noël, une fois décontaminés les principaux foyers, toutes les maisons et les terrains non cultivés ont été contrôlés dans un rayon de 100 m autour de ces foyers. La contamination prenait en général la forme de poussières déposées, en particulier dans les jardins. Toutefois, il y avait des indices que des déchets contaminés, provenant selon toute vraisemblance des maisons qui étaient les principaux sites de contamination, avaient été enfouis dans des terrains vagues avant l'intervention de la CNEN. Aucune action immédiate n'étant plus nécessaire, les moyens de décontamination ci-après ont été adoptés en vue de réduire le plus possible les quantités de déchets enlevées et de contrarier le moins possible la population:

- a) le débit de dose gamma a été mesuré;
- b) un profil de la zone où l'on a enregistré le débit de dose le plus élevé a été établi (voir la photographie 19);
- c) conformément aux critères qui avaient été fixés, la couche de sol contaminé indiquée par le profil ainsi qu'une couche supplémentaire ont été enlevées;
- d) le débit de dose gamma et la radioactivité spécifique moyenne du sol ont été mesurés;
- e) lorsque les résultats des mesures étaient proches des limites dérivées, la zone était recouverte d'une couche de 30 mm de sol frais.

10. STOCKAGE DES DECHETS

10.1. CHOIX DU SITE DE STOCKAGE DES DECHETS

Puisque, depuis le début, l'intervention donnait lieu à la production de déchets radioactifs, les techniciens ont immédiatement compris qu'il fallait trouver un site approprié à Goiânia ou dans les environs où les déchets, convenablement emballés, pourraient être rapidement transportés, ce qui faciliterait les opérations de décontamination. Compte tenu du volume probable de déchets initialement prévu et des problèmes de transport anticipés, le personnel technique a estimé qu'il fallait rapidement choisir un site, car tout retard aurait pu gêner les travaux.

La construction d'un site de stockage des déchets ne posait pas de difficulté technique particulière, mais le choix a été retardé pour des motifs politiques. Dans l'intervalle, le public a exprimé son refus de voir les déchets stockés à Goiânia, ou même dans l'Etat de Goiás. Néanmoins, après des négociations entre la CNEN et le Gouvernement de l'Etat de Goiás, la décision de nature politique a été qu'un site servirait à stocker provisoirement les déchets pendant une période pouvant aller jusqu'à deux ans et de reporter à plus tard le choix du site de stockage définitif. L'endroit qui a finalement été retenu se trouve dans une zone peu peuplée, à une vingtaine de kilomètres de Goiânia et à 2,5 km de la ville d'Abadia dans l'Etat de Goiás. (Voir les photographies 23, 24 et 27.)

10.2. CLASSIFICATION ET CONTROLE

A partir du 1^{er} octobre, l'équipe de spécialistes de la radioprotection a été chargée de s'occuper des déchets radioactifs. L'un de ses premiers actes a été de faire adopter l'usage d'un modèle de fiche, pour le stockage des déchets radioactifs (voir le tableau V), qui indique l'origine du déchet, son état physique, sa combustibilité, sa compactabilité, etc., ainsi que les débits de dose externe. (Ultérieurement, on a pu se fonder sur ces fiches pour faire l'inventaire du césium récupéré.)

Les déchets solides ont été classés, conformément à la législation existante (résolution CNEN-19/85, Production des déchets radioactifs dans les installations radiologiques, 27 novembre 1985), comme suit:

- 1) Déchets non radioactifs: radioactivité inférieure à $74 \text{ kBq} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($2 \text{ nCi} \cdot \text{g}^{-1}$).
- 2) Déchets de basse activité: débit de dose inférieur à $2 \text{ mSv} \cdot \text{h}^{-1}$ près de la surface de l'emballage.
- 3) Déchets d'activité moyenne: débit de dose supérieur à $2 \text{ mSv} \cdot \text{h}^{-1}$ mais inférieur à $20 \text{ mSv} \cdot \text{h}^{-1}$.

Les déchets liquides ont été solidifiés dans du ciment et classés de la même manière.

TABEAU V. MODELE DE FICHE POUR LE STOCKAGE DE DECHETS RADIOACTIFS

Commission nationale de l'énergie nucléaire		Provenance	N° de dossier
Contrôle des déchets radioactifs	
Numéro d'identification du colis:			
Type d'emballage	... Fût de 100 L	... Réceptacle métallique	... Fûts emboîtés de 100/200 L
	... Fût de 200 L	... Béton	... Fûts emboîtés de 40/100 L
	... VBA	... Fût de 40 L	... Fûts emboîtés de 40/200 L

Matières			
Déchets compactables	... Papier	... Tissu	...
	... Carton	... Céramique/verre	...
	... Plastique	... Plomb	...
Déchets non compactables	... Ferraille	... Terre	... Ustensiles ménagers
	... Gravats	... Bois	...
	... Ferblanterie	... Meubles	...
Nucléides émettant un rayonnement gamma/bêta: césium 137			
Masse du colis: kg			
Débit d'exposition à la surface du colis:	Maximum	(mR · h ⁻¹)
	Minimum	(mR · h ⁻¹)
Débit d'exposition maximale à 1 m de la surface du colis: (mR · h ⁻¹)			
Contamination surfacique non fixée: (μCi · cm ⁻²)			
Contrôle effectué par		Date:	
(Nom)			
.....		
Signature		Organisme	

10.3. EMBALLAGE

La plupart des déchets de basse activité ont été placés dans des fûts industriels ou dans des caisses métalliques nervurées. (Voir les photographies 18, 20, 22 et 23.) Les fûts, d'une capacité de 40, 100 et 200 L, sont en acier au carbone 18. Les caisses ont les caractéristiques suivantes: volume de 1,2 m³, charge maximale de 5 tonnes, surface résistante à la corrosion revêtue de peinture acrylique au chromate de zinc et couvercles boulonnés à joints en caoutchouc. Du ciment sec a été placé au fond des réceptacles pour absorber l'eau. Afin de limiter le nombre des emballages de dimensions différentes à manutentionner sur le site de stockage et d'assurer à certains types de déchets une double protection, les fûts de 40 et de 100 L ont été placés dans des fûts de 200 L ou des caisses métalliques. (Voir les photographies 18, 20, 22.)

Un volume important de déchets de basse activité était sous forme de balles de papier contaminées provenant du dépôt de ferraille III. (Voir la photographie 9.) Les balles ont été enveloppées dans du plastique, placées dans des conteneurs de transport (32 m³), et entreposées temporairement avant recyclage éventuel.

Les déchets d'activité moyenne ont été placés dans des fûts de 200 L qui ont eux-mêmes été mis dans des emballages cylindriques concentriques à parois en béton armé de 200 mm (VBA).

Les décisions concernant l'emballage ont été fortement influencées par le fait que le site n'est destiné qu'au stockage provisoire. Il a fallu au total 3800 fûts (200 L), 1400 caisses, dix conteneurs et six VBA. Fûts et conteneurs étaient disponibles dans le commerce. Les VBA étaient initialement destinés à la centrale nucléaire d'Angra. Les caisses ont été spécialement fabriquées à Goiânia.

10.4. CONCEPTION DU SITE DE STOCKAGE PROVISOIRE

Le site devait pouvoir accueillir les 4000 à 5000 m³ de déchets initialement prévus. En partant de l'hypothèse que la moitié des déchets serait mise dans des fûts et l'autre moitié dans des caisses, le site devait pouvoir accueillir 12 500 fûts et 1470 caisses. On a estimé que des plates-formes en plein air étaient ce qui convenait le mieux, compte tenu des conditions locales, des contraintes liées aux délais de construction et des exigences politiques.

Le modèle a été normalisé afin que les plates-formes puissent être construites rapidement. On a fixé les dimensions des dalles de ciment de manière à pouvoir disposer tous les fûts et caisses en utilisant l'espace au mieux. Chaque dalle a une épaisseur de 0,15 m et mesure 2,75 m × 2,75 m. Les caisses étant des cubes de 1,2 m de côté, chaque dalle peut recevoir huit caisses ou 32 fûts empilés par deux. Etant donné le nombre prévu de fûts et de caisses, on avait initialement estimé qu'il faudrait 574 dalles de ciment à répartir de façon optimale entre les plates-formes. (Voir les photographies 23 et 24.)

Sur la base d'hypothèses restrictives, on a décidé de ne construire dans un premier temps que six plates-formes qui ont suffi à accueillir les 3500 m³ de déchets réellement produits.

Pour protéger les caisses et les fûts des fortes pluies, on les a recouverts de plastique après les avoir soigneusement décontaminés préalablement au transfert sur le site de stockage. (Voir la photographie 21.) En outre, les dalles fabriquées sont semi-absorbantes et peuvent donc retenir la contamination résiduelle éventuellement produite par l'évaporation et la condensation sous le plastique.

Enfin, un système d'échantillonnage a été conçu en vue de la surveillance radiologique de l'eau (essentiellement l'eau de pluie) s'écoulant des plates-formes. (Voir la photographie 24). Un système de barrières naturelles (comportant notamment une digue utilisée pour les études sur l'environnement) a été construit pour ralentir l'écoulement de l'eau de drainage et accroître l'absorption du césium dans la zone du site de stockage.

Chaque réceptacle porte un numéro et son contenu est indiqué sur une fiche. Ces informations ont été traitées sur ordinateur au moyen d'un modèle mathématique pour prévoir les débits de dose dans les voies d'accès selon les différentes manières de disposer les fûts et caisses. Les colis les plus radioactifs ont été placés au centre des plates-formes pour réduire le plus possible les débits de dose dans les couloirs d'accès et le long de l'enceinte de sécurité.

Outre les travailleurs, on a également contrôlé le sol, les végétaux, les eaux de surface, les sédiments et l'air, et utilisé des dosimètres thermoluminescents pour mesurer les doses le long de l'enceinte de sécurité. Aucune fuite de matières radioactives n'a été décelée, mais l'humidité et la chaleur pourraient favoriser la corrosion en quelques années. Les fortes précipitations avaient déjà commencé à éroder le sol sous-jacent. Des études ont été entreprises pour trouver un moyen de stockage définitif, dont le prix sera probablement élevé, tant d'un point de vue économique que de celui des expositions professionnelles qui en découleront.

10.5. TRANSPORT DES DECHETS JUSQU'AU SITE DE STOCKAGE

Le transport des déchets s'est fait conformément à la réglementation brésilienne qui est très semblable au Règlement de transport des matières radioactives de l'AIEA⁷. Avant l'expédition, pour chaque colis on a mesuré le débit de dose et vérifié qu'il n'était pas contaminé. Les colis du type A ont été transportés par camions à pleine charge au maximum. Entre le 25 octobre et le 19 décembre,

⁷ AGENCE INTERNATIONALE DE L'ENERGIE ATOMIQUE, Règlement de transport des matières radioactives, Edition de 1985, Collection Sécurité n° 6, AIEA, Vienne (1985); et Supplément de 1986 (1987).

275 chargements de déchets ont été ainsi transportés jusqu'au site de stockage provisoire, par convois escortés par la police et roulant à une vitesse limite de $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ en ville et $45 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ailleurs. Chaque convoi était accompagné de spécialistes de la radioprotection équipés pour faire face à une éventuelle urgence. (L'un des camions est d'ailleurs sorti de la route et s'est renversé sans provoquer toutefois de libération de matières radioactives.) Les camions ont ensuite été contrôlés pour s'assurer de l'absence de contamination résiduelle.

10.6. INVENTAIRE

Les indications relatives aux débits de dose à l'extérieur des colis, portées sur les fiches susmentionnées, ont été utilisées par la suite pour estimer la radioactivité de chaque fût au moyen d'une méthode décrite dans un manuel⁸. Cette méthode suppose une distribution homogène de la radioactivité dans le volume cylindrique du fût et fait intervenir des facteurs modifiants pour tenir compte des protections et non-homogénéités connues du contenu. La qualité des estimations de la radioactivité dépendait de celle de diverses autres estimations, notamment de celle de la masse. (De meilleures estimations n'auraient pu être obtenues qu'au prix de débits d'exposition professionnelle plus élevés qui ne semblaient pas justifiés.)

La meilleure estimation de l'activité des déchets récupérés, ajoutée à celle qui a été retrouvée à l'Hôpital naval Marcilio Dias, était d'environ 44 TBq (1200 Ci). Bien que l'intervalle d'erreur englobe la valeur connue de l'activité du chlorure de césium de la source avant l'accident, qui était de 50,9 TBq (1375 Ci), des journalistes ont prétendu qu'il y avait encore dans l'environnement une contamination potentielle de «centaines de curies». Etant donné les circonstances, cet inventaire de l'activité des déchets était le meilleur que l'on pût espérer. Certes, restait une contamination radioactive, par exemple sur les toits et dans le sol, mais en quantités négligeables. Les estimations de la radioactivité des déchets devaient avoir valeur de confirmation. C'est essentiellement sur les résultats des nombreuses et multiples mesures de la radioactivité dans l'environnement qu'est fondée la certitude de l'absence totale de risque résiduel significatif.

10.7. SUIVI

Une fois terminées les opérations de décontamination, on a entrepris d'autres travaux de surveillance et de recherche. La surveillance du site de stockage et de ses alentours devait continuer d'être assurée en gage de sûreté jusqu'à ce qu'une décision

⁸ ROCKWELL, THEODORE, III, Reactor Shielding Design Manual, Van Nostrand, Princeton, NJ (1956).

concernant le stockage définitif des déchets permette de le libérer. A Goiânia, le réseau d'échantillonnage qui avait été établi a été maintenu pour vérifier l'efficacité de la décontamination. En outre, plusieurs travaux de recherche ont été entrepris, dont certains conjointement avec des universités et d'autres établissements scientifiques nationaux et internationaux, afin de tirer parti de cette singulière occasion d'étudier les mécanismes de la migration du césium dans l'environnement, en particulier en zone urbaine.

Partie IV

OBSERVATIONS ET RECOMMANDATIONS

L'examen des accidents radiologiques par les spécialistes fournit des informations qu'en retour on peut utiliser dans la conception des systèmes de contrôle pour réduire la probabilité des accidents et mieux se préparer à intervenir le cas échéant. Cet examen permet d'améliorer l'état des connaissances, et sert en outre à illustrer et à mettre en lumière des principes et critères qui, quoi qu'il en soit, sont en général déjà bien connus. Tel est l'objet des observations et recommandations ci-après, qui s'inspirent de l'examen international de l'accident radiologique de Goiânia, mais pas forcément des circonstances particulières de l'accident.

L'accident de Goiânia montre comment un comportement qui aurait été banal dans des circonstances normales se révèle extrêmement dangereux lorsque des matières radioactives sont en jeu. Cette constatation confirme une règle fondamentale de la protection radiologique, à savoir que la sûreté de la source est capitale. Les sources radioactives, lorsqu'elles sont retirées de l'endroit spécifié dans toute la procédure de notification, d'enregistrement et d'autorisation, peuvent constituer un risque majeur. La personne responsable d'une source radioactive devrait donc prendre les moyens de prévenir un tel risque, par exemple en adoptant des procédures de contrôle (audit) et des mesures de protection physique appropriées. Il convient toutefois de noter en passant que cette nécessité d'une protection physique se retrouve partout dans le vaste domaine de la sûreté des matières dangereuses, par exemple s'agissant de poisons tels que le cyanure et l'arsenic.

La règle selon laquelle les sources radioactives doivent être maintenues dans un état sûr et sous contrôle doit se traduire dans le système de contrôle établi par les autorités compétentes nationales et fondé sur un règlement et des inspections réglementaires, ce qui est bien le cas au Brésil. Cela dit, l'existence d'un système de contrôle ne diminue en rien les obligations de la personne désignée comme responsable de la source radioactive. Le système de contrôle ne peut ni ne doit d'aucune façon dégager la direction de l'établissement de sa responsabilité; en particulier, il ne peut se substituer au titulaire de l'autorisation en tant que responsable de la sûreté. Il ne devrait être considéré que comme un moyen de vérifier que le nécessaire est fait par les cadres et les exécutants; en particulier, il peut prévoir un contrôle (audit) pour vérifier que le titulaire s'acquitte de cette responsabilité. C'est le rôle notamment des inspections d'installations, dont la fréquence est nécessairement limitée par les ressources disponibles.

Les moyens appropriés de se conformer aux prescriptions réglementaires devraient être spécifiques et simples, et leur emploi devrait pouvoir être imposé. Ainsi, l'organisme réglementaire pourrait envisager d'exiger aussi du titulaire

responsable d'une source de haute activité que notification lui soit faite chaque fois que l'intégrité de la source est vérifiée, et pas seulement que le titulaire tienne un registre pour examen lors des inspections. Cette notification serait faite sur carte postale directement exploitable par machine. Si le titulaire n'envoyait pas cette pièce dans les délais prescrits, l'organisme réglementaire saurait qu'il pourrait falloir contrôler l'état de la source. Cette méthode répondrait aux critères de spécificité, de simplicité et de facilité d'application mentionnés plus haut. En outre, elle permettrait d'améliorer la communication qui doit s'établir entre tous ceux qui participent à la mise en œuvre des exigences de protection radiologique et à son contrôle. Il conviendrait néanmoins d'évaluer le rapport coût-efficacité de cette procédure avant de l'introduire.

Il faudrait rechercher un moyen de signaler les risques d'irradiation d'une façon aisément compréhensible pour le grand public. L'intérêt qu'a suscité la lueur bleutée de la source radioactive au chlorure de césium a grandement influé sur le cours des événements à Goiânia. Des marques claires et faciles à comprendre apposées sur les sources de rayonnements devraient contribuer à réduire la probabilité d'accidents radiologiques.

Les propriétés physiques et chimiques des sources devraient être prises en compte lors de l'examen de la demande de l'autorisation de fabriquer, car elles déterminent les effets que peuvent avoir les sources accidentées ou détournées de leur emploi. La solubilité du chlorure de césium et la facilité avec laquelle il se disperse ont joué un rôle prépondérant dans l'accident de Goiânia. De nombreuses sources au césium 137 moins radioactives en usage sont sous une forme vitrifiée qui empêche la dispersion. Malheureusement, elles ne peuvent alors avoir la forte radioactivité spécifique nécessaire pour la radiothérapie.

Si, malgré toutes les précautions, survient un accident qui présente un risque radiologique, il faudrait qu'existent un réseau d'information et une structure de commandement connus de tous les intéressés. En particulier, pour intervenir en cas d'accident grave, un pays devrait vraisemblablement recourir à un grand nombre de ses agents qualifiés, pouvant appartenir à de nombreux établissements distincts, et utiliser une grande partie du matériel à leur disposition. Le Plan d'intervention devrait prévoir la nécessité d'une intégration de tous ces éléments, et il faudrait que cette structure de commandement ait été constituée.

A cet égard, il est important non seulement de répartir les responsabilités, mais aussi de déléguer des pouvoirs dans la mesure nécessaire pour court-circuiter la bureaucratie. Ainsi, l'accident de Goiânia s'est produit à une grande distance des centres spécialisés. La logistique a donc posé de gros problèmes (le transport aérien s'est révélé indispensable). Une structure de commandement bien constituée simplifiera les problèmes de logistique en cas d'urgence et permettra notamment une mobilisation immédiate.

Il s'ensuit que les plans d'intervention en cas d'urgence radiologique devraient s'appliquer non seulement aux accidents nucléaires, mais aussi à toute la gamme des

accidents radiologiques possibles. Les autorités nationales et internationales ont beaucoup travaillé pour se préparer à faire face aux accidents nucléaires; en revanche, les autres types d'urgence radiologique n'ont pas reçu toute l'attention souhaitable. L'accident de Goiânia est un exemple d'accident radiologique grave survenu en dehors de l'industrie nucléaire. Il ne s'agit pas là d'un cas unique, l'accident de Goiânia présentant de fortes similitudes avec l'accident de Ciudad Juárez qui s'est produit au Mexique en 1983. (Dans son rapport sur la sûreté nucléaire pour 1987, l'AIEA passe brièvement en revue les accidents radiologiques mortels survenus antérieurement; se reporter à l'appendice III.) La plupart de ces accidents mortels se sont produits en dehors de l'industrie nucléaire; il conviendrait peut-être de faire une plus large place à la protection radiologique dans le secteur non nucléaire.

En outre, lors de la planification des interventions, les pouvoirs publics devraient s'assurer que, dans le cas d'un accident radiologique concernant la population, soient disponibles des moyens bien connus pour demander des secours et notifier les autorités compétentes. Les moyens les plus efficaces dépendent de l'organisation des services publics dans le pays, mais on peut toujours avoir recours à des services locaux tels que la police ou les pompiers qui sauront à qui s'adresser.

En cas d'accident radiologique, on peut avoir besoin non seulement d'installations réservées permanentes, mais aussi d'un matériel aisément transportable pour les analyses biochimiques et l'anthroporadiométrie. Il faudra aussi éventuellement faire appel à des spécialistes sachant adapter des procédures normales à une situation exceptionnelle. Il pourrait être utile d'examiner les plans d'intervention dans cette perspective.

L'élimination rapide de la contamination interne est un élément important lorsqu'un accident mettant en jeu des matières radioactives se produit. La preuve a été faite de l'efficacité du bleu de Prusse dans l'élimination de la contamination interne par le césium 137. Le seuil d'efficacité semble être une dose de 3 g par jour (administration par voie orale de 1 g trois fois par jour). Les organismes pharmaceutiques nationaux pourraient envisager d'autoriser, pour les cas d'urgence, l'administration par voie orale de 10 à 12 g par jour pour les adultes.

La dosimétrie cytogénétique est un procédé extrêmement utile pour estimer la dose d'irradiation globale et la non-homogénéité de la dose chez un patient. Elle fournit des renseignements utiles au médecin chargé d'établir le diagnostic et le pronostic. Il serait bon que les autorités nationales examinent leurs plans d'intervention pour s'assurer qu'elles disposent, dans le pays ou au titre d'arrangements de coopération internationale, de laboratoires capables d'effectuer ces analyses. Des programmes de comparaison interlaboratoires devraient être exécutés pour parvenir au niveau de cohérence souhaité.

D'autres études sur l'emploi expérimental et clinique du facteur de stimulation des colonies de granulocytes microphages doivent être menées pour comprendre les résultats controversés obtenus après l'accident de Goiânia, avant d'en recommander l'utilisation en cas d'accident radiologique. Ces résultats sont peut-être attribuables

au fait que l'on ne sait pas encore exactement quelle est la dose optimale à administrer, ni à quel moment le faire.

Après des accidents radiologiques, des malades ont consulté des médecins qui, en général, n'ont pas attribué leurs symptômes à une irradiation. Ce problème du diagnostic se pose très souvent dans ce type d'accidents, dont les effets sont notamment attribués à des piqûres d'insectes, à des morsures d'araignées ou de serpents, à des infections virales ou à une exposition à des produits chimiques. Le diagnostic des radiolésions ne peut se faire que si le personnel non nucléaire possède les connaissances requises et si sont disponibles des médecins et techniciens de la radioprotection, spécialement formés, ce qui suppose des programmes éducatifs largement diffusés. L'accident de Goiânia pourrait très bien constituer une étude de cas à inclure dans les programmes d'enseignement destinés aux médecins et au personnel de radioprotection ainsi qu'à tous les responsables de sources de haute activité.

La thérapie à adopter dans le cas d'accidents radiologiques est actuellement variée et complexe. Les patients doivent être soignés dans des hôpitaux par du personnel constamment occupé aux traitements hématologique, chimiothérapeutique, radiothérapeutique et chirurgical de malades menacés de cancers, d'immuno-dépression et de dyscrasie sanguine. En général, le personnel et les services médicaux ne sont pas prêts à répondre à des urgences radiologiques ou à traiter des cas de radiolésions. Il faudrait donc prévoir, dans les plans d'intervention, que les premiers soins seront donnés par des médecins spécialistes capables de traiter ces patients.

Après un accident radiologique provoquant une contamination étendue, on est généralement tenté d'imposer, pour entreprendre des actions correctives, des critères extrêmement restrictifs qui répondent la plupart du temps à des considérations d'ordre politique et social. Leur application implique un gros effort sur le plan économique et social en plus des frais occasionnés par l'accident lui-même. L'AIEA a recommandé un éventail de niveaux de référence pour les actions correctives que l'on considère comme n'étant pas inutilement restrictif⁹. En outre, les sauveteurs n'ont pas toujours la possibilité, compte tenu de l'urgence de la situation, de mettre au point un système compliqué de niveaux de référence pour les actions et préfèrent parfois se fonder sur les limites de dose fixées pour les irradiations prévues normales. Il s'agit là d'une restriction inutile, car ces limites de dose ne sont pas destinées à s'appliquer à ceux qui subissent une irradiation imprévue consécutive à un accident. Cela dit, il ne faut pas sous-estimer l'importance d'un autre paramètre, variable selon les pays, à savoir les pressions sociales et politiques qui influencent le processus de la prise de décisions.

⁹ AGENCE INTERNATIONALE DE L'ENERGIE ATOMIQUE, Principes relatifs à l'établissement de niveaux d'intervention pour la protection du public dans le cas d'un accident nucléaire ou d'une urgence radiologique, Collection Sécurité n° 72, AIEA, Vienne (1986).

Dans l'accident de Goiânia, le levé radiologique et la décontamination ont posé des problèmes pratiques qui sont exposés en détail dans les chapitres 8 et 9 et dans les annexes I, III et IV. Deux observations méritent cependant d'être faites ici:

- a) les appareils de mesure doivent pouvoir fonctionner dans des conditions ambiantes extrêmes;
- b) on devra presque certainement faire appel à des travailleurs n'ayant aucune expérience radiologique, les cadres eux-mêmes n'ayant pas toujours l'expérience pratique souhaitable. Des moyens de formation devraient donc être prévus dans les plans d'intervention.

Si l'on veut tirer des enseignements de l'expérience acquise lors des accidents et les mettre à profit en retour pour améliorer les plans d'intervention, il faut, dès que possible après l'accident, établir un compte rendu des faits dont le souvenir a tendance à s'estomper avec le temps. Pour ce faire, il faudrait qu'un rédacteur fasse partie de l'équipe d'intervention à titre officiel dès le départ; par la suite, la reconstitution des faits et l'évaluation de l'expérience acquise en seraient facilitées.

La diffusion de renseignements auprès des médias, du public et du personnel d'intervention lui-même est particulièrement importante. Lorsqu'un accident se produit, l'information est une responsabilité qui pèse lourdement sur les épaules de ceux qui s'efforcent d'en atténuer les conséquences. Il est donc recommandé que les équipes d'intervention bénéficient d'un appui en matière d'administration et d'information qui soit proportionnel à l'importance de l'accident. Pour les accidents graves, il faut que cet appui soit rapidement disponible sur place. Tous ceux qui sont susceptibles d'être mobilisés et appelés à intervenir en cas d'urgence radiologique devraient recevoir une formation, tant théorique que pratique, adaptée aux fonctions qui seraient les leurs.

L'accident de Goiânia est l'un des plus graves accidents radiologiques qui se soient jamais produits. Il a fait quatre morts et de nombreux blessés par irradiation et a provoqué la contamination radioactive de plusieurs quartiers de la ville. Les accidents radiologiques sont rares, mais cela ne justifie pas que l'on s'endorme sur ses lauriers. Il n'y a pas d'accident radiologique qui soit acceptable, et le public doit avoir la certitude que les autorités compétentes et les responsables ne négligent rien pour empêcher qu'il ne s'en produise. Un des moyens d'atteindre cet objectif consiste à tirer des enseignements de l'accident de Goiânia.

PHOTOGRAPHIES

*Toutes les photographies sont reproduites avec l'aimable autorisation
de la Commission nationale de l'énergie nucléaire (CNEN),
Rio de Janeiro, Brésil*

- 1-3. Locaux abandonnés de l'Instituto Goiano de Radioterapia, une clinique de radiothérapie, à Goiânia. Une source de haute activité a été enlevée d'un appareil de téléthérapie laissé dans ces locaux. (Voir 3.1.)
4. Le physicien W.F., qui a découvert l'accident, manie un contaminamètre au stade olympique. (Voir 4.1.)
5. Dépistage des personnes contaminées au stade olympique. (Voir 4.1.)
6. Matériel mobile de contrôle radiologique: détecteurs au NaI et Geiger-Müller montés sur une voiture. Plus de 2000 km de voies ont été contrôlés par ce moyen. (Voir 7.2, 8.2.)
7. Préparatifs avant la démolition de la maison de E.F.2 et de S.F.1, près du dépôt de ferraille I. (Voir le chapitre 9.)
8. Contrôle radiologique du toit de la maison de E.F.2 et S.F.1 pendant la démolition. (Voir le chapitre 9.)
9. Balles contaminées de papier de récupération destiné à être recyclé. Certaines balles ont été expédiées dans d'autres villes. (Voir le chapitre 9.)
10. Démolition de la maison de L.F.2, la petite fille de 6 ans qui est décédée des suites de l'accident, près du dépôt de ferraille II. Un excavateur enlève un point chaud donnant lieu à un débit de dose de $0,5 \text{ Sv}\cdot\text{h}^{-1}$. (Voir le chapitre 9.)
11. Déblaiement du site au dépôt de ferraille II dans la Rua 6. (Voir le chapitre 9.)
12. Dépôt de ferraille II: des poutrelles contaminées sont découpées. (Voir le chapitre 9.)
- 13, 14. Gravats contaminés après démolition de la maison de R.A. dans la Rua 57 où le barillet a été démonté et l'enveloppe brisée. (Voir le chapitre 9.)
15. Ramassage d'objets contaminés au dépôt de ferraille III. (Voir le chapitre 9.)
16. Découpage d'objets contaminés avant ramassage au dépôt de ferraille III. La contamination fixée au sol était telle qu'il a fallu couler une dalle de béton. (Voir le chapitre 9.)
17. Décontamination d'un véhicule. Environ 50 véhicules contrôlés étaient contaminés. (Voir le chapitre 9.)
18. Moyen de fortune pour remplir simultanément huit fûts avec de la terre contaminée. (Voir 10.3.)

19. Mesure de la contamination du sol. (Voir 8.3 et le chapitre 9.)
20. Une des caisses de 5 tonnes spécialement fabriquées pour le stockage des déchets. (Voir 10.3.)
21. Equipe de décontamination travaillant sous une pluie battante. (Voir le chapitre 9 et 10.4.)
22. Des conteneurs de déchets sont empilés avant d'être transportés par camion jusqu'au site de stockage provisoire. (Voir 10.3.)
23. Caisses et fûts de déchets empilés et recouverts au site de stockage provisoire. (Voir 10.1, 10.2, 10.3.)
24. Site de stockage provisoire; les rigoles entre les dalles de ciment permettent d'échantillonner l'eau de ruissellement. (Voir 10.1, 10.4.)
25. E.F., le 20 octobre 1987, 25 jours environ après l'irradiation. Radiolésion sur la cuisse provoquée par un fragment de la source au césium 137 qui se trouvait dans une poche du pantalon. L'escarre étendue que l'on voit au centre de la lésion est typique des doses dues au rayonnement gamma instantané de plus de 50 Gy et reçues dans le derme et les tissus sous-jacents (jusqu'à une profondeur de 1 à 3 cm). (Voir 5.1, 5.3.)
26. E.F., le 30 décembre 1987. Progression de la lésion qui a atteint la musculature. La plaie avait été plusieurs fois débridée. Dimensions approximatives de la lésion: 100 mm × 120 mm. (Voir 5.1, 5.3.)
27. Conteneurs de déchets sur le site de stockage provisoire. Du 25 octobre au 19 décembre, 275 chargements de déchets ont été transportés par camion jusqu'au site. (Voir 10.1.)
28. O.F.1., le 11 octobre 1987, 19 jours environ après l'irradiation. Phlyctène étendue sur la paume de la main de celui qui a aidé à enlever la source au césium 137. Remarquer la desquamation humide sur le pouce et les doigts. (Voir 5.1, 5.3.)
29. O.F.1., le 28 octobre 1987, 36 jours environ après l'irradiation. Progression de la lésion sur la paume de la main. La phlyctène s'est ouverte et la blessure s'est étendue à l'index et au médus. Remarquer la phalange de l'index avec laquelle l'homme avait extrait du césium 137 de l'enveloppe de la source. (Voir 5.1, 5.3.)
30. O.F.1., le 30 novembre 1987, 69 jours environ après l'irradiation. Cicatrisation partielle de la lésion sur la paume de la main. (Voir 5.1, 5.3.)
31. Lésion cutanée superficielle (en voie de cicatrisation) due à une irradiation bêta des membres inférieurs d'une personne gravement contaminée. La photographie a été prise 60 jours environ après l'irradiation. (Voir 5.1, 5.3.)
32. L'anthroporadiamètre de fortune utilisé à Goiânia. Remarquer la distance exceptionnellement grande entre le patient et le détecteur et la chaise longue. (Voir 5.2, 6.1.)



1. Goiânia — Locaux abandonnés d'où la source au césium a été emportée.



2. Goiânia — Locaux abandonnés d'où la source au césium a été emportée.



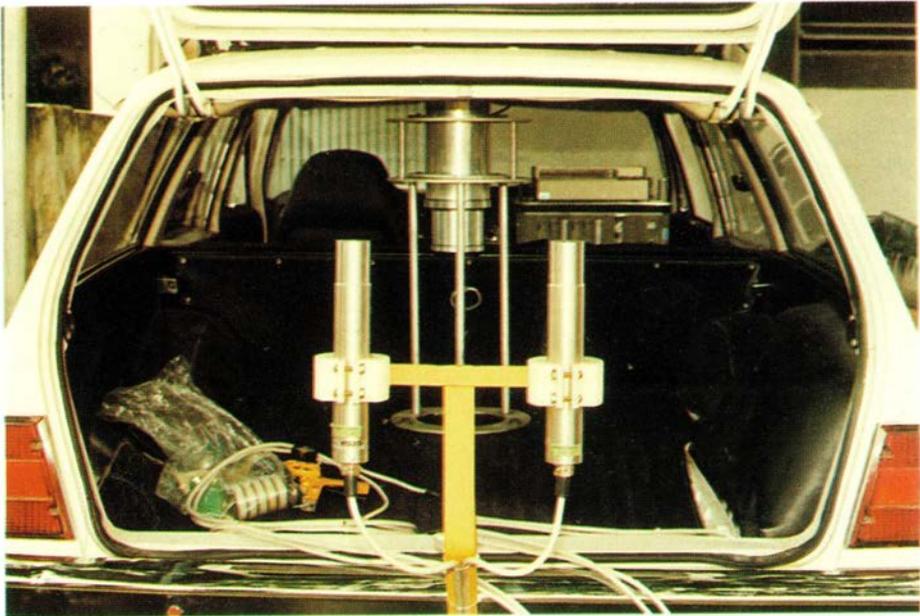
3. Goiânia — Locaux abandonnés d'où la source au césium a été emportée.



4. Le physicien W.F. manie un contaminamètre au stade olympique.



5. *Dépistage des personnes contaminées, au stade olympique.*



6. *Matériel mobile de contrôle radiologique: détecteurs au NaI et GM montés sur un break.*



7. Préparatifs avant la démolition de la maison de E.F.2 et S.F.1, près du dépôt de ferraille 1.



8. Contrôle radiologique du toit de la maison de E.F.2 et S.F.1 pendant la démolition.



9. Balles contaminées de papier de récupération destiné à être recyclé.



10. Enlèvement à l'excavateur d'un point chaud donnant lieu à un débit de dose de $0,5 \text{ Sv}\cdot\text{h}^{-1}$.



11. Déblaiement du site du dépôt de ferraille II dans la Rua 6.



12. Dépôt de ferraille II: des poutrelles contaminées sont découpées.



13. Gravats contaminés après démolition de la maison de R.A. dans la Rua 57.



14. Le même endroit après enlèvement des gravats.



15. Ramassage d'objets contaminés au dépôt de ferraille III.



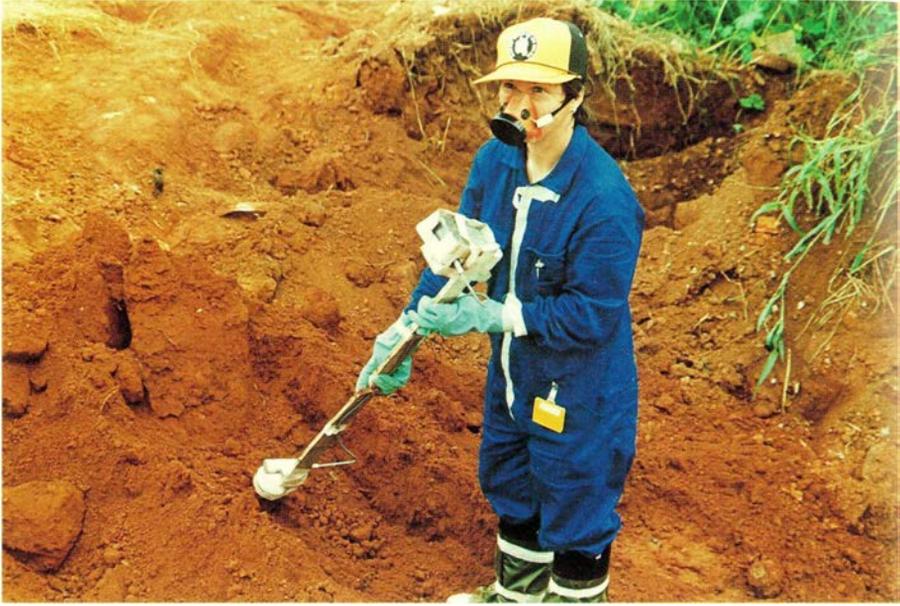
16. Découpage d'objets contaminés avant ramassage au dépôt de ferraille III.



17. Décontamination de l'un des quelque 50 véhicules contaminés.



18. Moyen de fortune pour remplir simultanément 8 fûts avec de la terre contaminée.



19. *Mesure de la contamination du sol.*



20. *Une des caisses de cinq tonnes spécialement fabriquées pour le stockage des déchets.*



21. *Equipe de décontamination travaillant sous une pluie battante.*



22. *Des conteneurs de déchets sont empilés avant d'être transportés au site de stockage provisoire.*



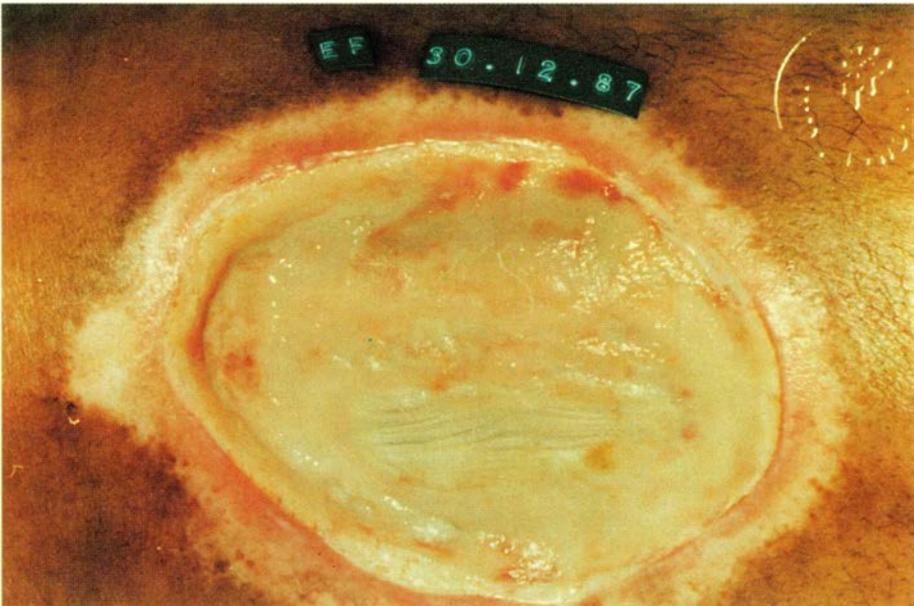
23. *Caisses et fûts de déchets empilés et recouverts au site de stockage provisoire.*



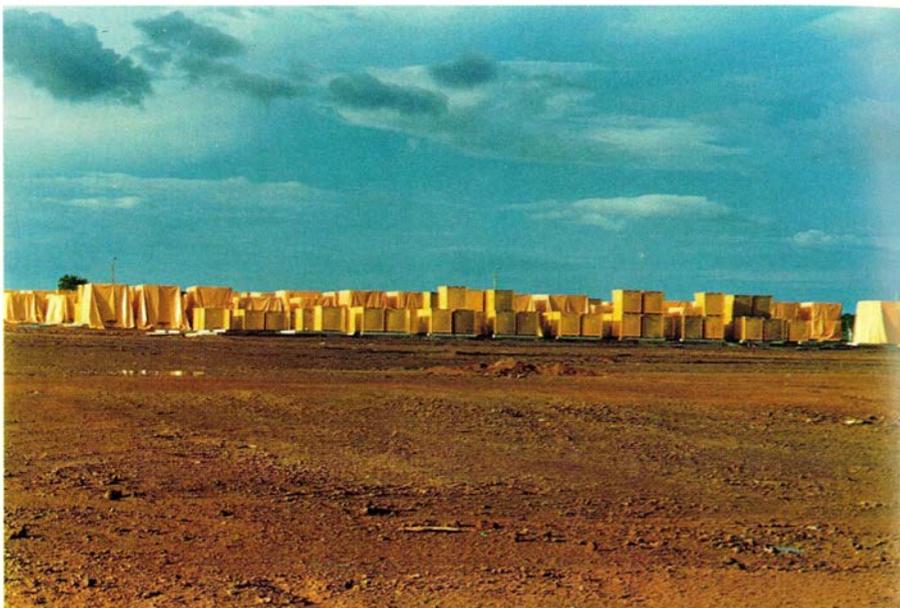
24. *Site de stockage provisoire; dalles de ciment et rigoles d'échantillonnage de l'eau de ruissellement.*



25. Radiolésion sur la cuisse, 25 jours environ après l'irradiation.



26. La lésion s'est étendue aux muscles de la cuisse et mesure 100 mm × 120 mm.



27. *Conteneurs de déchets sur le site de stockage provisoire.*



28. *Phlyctène étendue sur la paume de la main, avec desquamation humide.*



29. *La phlyctène s'est ouverte et la lésion s'est étendue à l'index et au médus.*



30. *Cicatrisation partielle de la lésion sur la paume de la main.*



31. *Lésion cutanée superficielle (en voie de cicatrisation).*



32. *Anthroporadiamètre de fortune utilisé à Goiânia.*

Appendice I

COOPERATION INTERNATIONALE

Avant l'accident de Goiânia

Les instituts de la CNEN étaient capables de faire le nécessaire pour maîtriser l'accident de Goiânia, c'est-à-dire pour procéder à l'évaluation des doses de rayonnements, au diagnostic, au pronostic et au traitement des cas de surexposition, et à la maîtrise de la grave contamination de l'environnement.

Le programme de coopération entre l'AIEA et le Brésil relatif à la préparation pour les cas d'urgence a été très utile à cet égard. Ce programme, dont l'exécution avait commencé par l'envoi d'une mission d'experts au Brésil bien avant l'accident de Goiânia, a permis la construction de laboratoires et la formation de personnel par le biais de bourses et de missions d'experts. Le premier projet prévoyait notamment la formation d'un médecin à l'intervention en cas d'accident radiologique, ce qui s'est révélé extrêmement utile en l'occurrence.

Pendant l'intervention

Les autorités brésiliennes ont informé l'AIEA de l'accident peu après sa découverte et ont demandé une aide aux termes de la Convention internationale sur l'assistance en cas d'accident nucléaire ou de situation d'urgence radiologique. L'aide fournie a consisté en services d'experts et matériel. (Voir le tableau VI pour plus de détails.)

Depuis l'accident

Depuis l'accident, de nombreuses activités ont été entreprises conjointement par des spécialistes du Brésil et d'autres pays pour évaluer l'expérience acquise et en tirer des enseignements. L'examen international sur lequel se fonde le présent rapport est l'une de ces activités. La manière dont l'assistance internationale a été fournie et coordonnée sera notamment évaluée afin d'apporter les améliorations nécessaires.

L'accident de Goiânia a permis de constituer une importante base de données qui peut fournir des renseignements d'intérêt permanent dans des domaines très divers. Plusieurs projets de recherche scientifique sont en cours d'exécution, d'autres sont prévus et d'autres encore seront peut-être proposés. Les organisations internationales devraient promouvoir l'échange d'informations sur les leçons tirées de l'accident.

TABLEAU VI. COOPERATION INTERNATIONALE EN REPONSE A L'ACCIDENT DE GOIANIA

Pays/ Organisation	Type de collaboration	Type d'assistance	Domaine d'intervention	Etablissement d'origine
AIEA	Coopération technique	Services d'experts/ Matériel	Radioprotection	
Allemagne, Rép. féd. d'	Bilatérale	Services d'experts/ Matériel	Radioprotection	Institut für Strahlenschutz, Munich
Allemagne, Rép. féd. d'	AIEA	Matériel	Radioprotection	
Argentine	Bilatérale	Services d'experts	Médecine	Commission nationale de l'énergie atomique
Argentine	Bilatérale	Services d'experts	Radioprotection et stockage des déchets	Commission nationale de l'énergie atomique
CCE, Ispra	Coopération technique	Matériel	Radioprotection	
Etats-Unis d'Amérique	Volontaire	Services d'experts/ Matériel	Médecine	Université de Californie
Etats-Unis d'Amérique	Volontaire	Services d'experts	Médecine	Hôpital municipal de Boston

Etats-Unis d'Amérique	AIEA	Services d'experts	Radioprotection	Department of Energy, Radiation Emergency Assistance Center/ Training Site, Oak Ridge (REAC/TS)
Etats-Unis d'Amérique	AIEA	Services d'experts	Médecine	REAC/TS
France	Bilatérale	Services d'experts/ Matériel	Médecine/Radioprotection	
France	AIEA	Matériel	Radioprotection	
Hongrie	AIEA	Matériel	Radioprotection	
Israël	AIEA	Matériel	Radioprotection	
Japon	Volontaire	Services d'experts	Médecine	Institut des maladies délicates sur le plan thérapeutique
OMS	Coopération technique	Services d'experts	Radioprotection	
Pays-Bas	AIEA	Matériel	Radioprotection	
Royaume-Uni	AIEA	Matériel	Radioprotection	
URSS	Volontaire	Services d'experts	Médecine	Centre hospitalier No 6, Moscou

Observations

- L'AIEA devrait envisager d'intensifier la formation relative à la préparation pour les cas d'urgence au niveau régional, notamment en encourageant la participation de personnes de la région ayant une expérience dans ce domaine et en organisant des exercices pratiques sur le terrain dans les conditions spécifiques de la région.
- L'AIEA devrait régulièrement organiser des échanges d'informations au plan régional sur les points forts et les points faibles de la préparation pour les cas d'urgence.
- L'AIEA devrait poursuivre ses efforts visant à fournir en cas d'urgence une assistance débarrassée de toute bureaucratie.

Appendice II

INFORMATION DU PUBLIC

L'accident de Goiânia a eu un très fort impact psychologique sur la population brésilienne qui l'a associé à l'accident survenu dans la centrale nucléaire de Tchernobyl, en URSS, en 1986. Beaucoup avaient peur de la contamination et de l'irradiation et craignaient pour leur santé, redoutant même des maladies incurables ou mortelles.

Certains habitants de Goiânia ont été mis à l'écart, même par leurs parents, et les ventes de bétail, de céréales et d'autres produits agricoles, ainsi que de tissus et de cotonnades, principales sources de revenus de l'Etat de Goiás, ont diminué de 25% après l'accident.

Les techniciens de la CNEN ont mené après l'accident une enquête qui a donné les résultats ci-après:

- a) 90% environ de la population de Goiânia n'ont pas eu à se plaindre d'une diminution sensible de leur niveau de vie ou d'une détérioration de leurs conditions de travail;
- b) s'agissant des personnes directement concernées par l'accident, des conséquences notables ont été constatées aux plans familial (30% environ) et professionnel (30% environ);
- c) sur le total des personnes qui ont fait l'objet d'un contrôle radiologique, 74% étaient venues spontanément par crainte des rayonnements.

Pour apaiser ces craintes, on a recommandé aux équipes d'intervention d'expliquer aux gens ce qu'elles faisaient et pourquoi, et d'accepter par exemple l'eau et les vivres qu'on leur offrait. Elles ont ainsi gagné la confiance de la population et renforcé la crédibilité des déclarations officielles.

Les membres des équipes sont intervenus plusieurs fois à la télévision. En se référant dans un langage simple à des applications courantes des rayonnements, par exemple à la radiologie médicale, ils exposaient ce que l'on savait alors de la situation.

En outre, si les coordonnateurs estimaient difficile d'expliquer au public certains aspects de la radioprotection, on réunissait des journalistes pour leur décrire en termes simples les applications et les effets des rayonnements. Une brochure sur le thème «Ce qu'il vous faut savoir sur la radioactivité et les rayonnements» a été rédigée et distribuée à 250 000 exemplaires. Un service téléphonique fonctionnant 24 heures sur 24 a été mis en place pour répondre aux questions ou recevoir des informations sur les autres personnes ou sites éventuellement contaminés.

Plusieurs réunions d'information ont été organisées à l'intention de divers groupes de la population et de diverses associations pour redonner confiance aux gens et permettre à la vie publique de continuer normalement.

On distingue deux phases dans la réaction des médias (presse, radio et télévision). La première s'est caractérisée par le sensationnalisme, l'information erronée et la critique des pouvoirs publics. Dans la seconde, les médias ont adopté une attitude plus responsable, s'efforçant d'informer le public et de rendre compte plus clairement des événements et des mesures prises par la CNEN, les autorités fédérales et celles de l'Etat.

Pour encourager une présentation plus sérieuse des événements, le personnel de la CNEN a consacré beaucoup de temps aux médias, leur montrant et leur expliquant ce qu'il faisait. Des journalistes ont pu accompagner les techniciens de la CNEN affectés à la décontamination et au traitement des victimes.

Appendice III

L'ACCIDENT DE GOIÂNIA DANS SON CONTEXTE

(Extrait du Rapport d'ensemble sur la sûreté nucléaire pour 1987 de l'AIEA)

Les accidents radiologiques graves

«Il existe une abondante documentation sur les accidents qui, depuis 1945, ont causé de fortes surexpositions aux rayonnements¹⁰. [Voir les tableaux VII et VIII.] La plupart de ceux qui ont mis en cause des installations nucléaires se sont produits

TABLEAU VII. ACCIDENTS RADIOLOGIQUES GRAVES SIGNALES (1945-1987)

Type d'installation	Nombre d'accidents	Surexpositions ^a	Décès
<i>Installations nucléaires</i>	27 (34%)	272 (64%)	35 (59%)
<i>Installations non nucléaires</i>			
Industrie	42 (52%)	84 (20%)	20 (34%)
Recherche	7 (9%)	10 (2%)	- (-)
Médecine	4 (5%)	62 (14%)	4 (7%)
	80 (100%)	428 (100%)	59 (100%)

^a Par «surexposition», on entend ici une exposition de l'organisme entier, des organes hématopoïétiques ou d'autres organes critiques, à 0,25 Sv ou plus; une exposition de la peau à 6 Sv ou plus; d'autres expositions externes à 0,75 Sv ou plus; une contamination interne de la moitié ou plus de la «charge organique maximale admissible». (La notion de «charge organique maximale admissible» a été remplacée par celle de «limite annuelle d'incorporation».) Le tableau ne tient compte ni des cas de malades en traitement ni des cas d'exposition à l'extérieur du site de Tchernobyl.

¹⁰ The Medical Basis for Radiation Accident Preparedness (Proc. REAC/TS Int. Conf. Oak Ridge, TN, 1979) (HÜBNER, K.F., FRY, S.A., Eds), North-Holland, New York (1980); COMITE SCIENTIFIQUE DES NATIONS UNIES POUR L'ETUDE DES EFFETS DES RAYONNEMENTS IONISANTS, Rayonnements ionisants: sources et effets biologiques, Rapport à l'Assemblée générale, Nations Unies, New York (1982).

TABLEAU VIII. ACCIDENTS RADIOLOGIQUES MORTELS SIGNALES
(1945-1987)^a

Année	Lieu	Source de rayonnement	Décès	
			Travailleurs	Public
1945	Los Alamos (Etats-Unis)	Assemblage critique	1	
1946	Los Alamos (Etats-Unis)	Assemblage critique	1	
1958	Vinča (Yougoslavie)	Réacteur expérimental	1	
1958	Los Alamos (Etats-Unis)	Assemblage critique	1	
1961	Suisse	Peinture tritiée	1	
1962	Mexico (Mexique)	Source de radiographie perdue		4
1963	Chine	Irradiateur de semences		2
1964	Allemagne, Rép. féd. d'	Peinture tritiée	1	
1964	Rhode Island (Etats-Unis)	Usine de récupération de l'uranium	1	
1975	Brescia (Italie)	Irradiateur d'aliments	1	
1978	Algérie	Source de radiographie perdue		1
1981	Oklahoma (Etats-Unis)	Radiographie industrielle	1	
1982	Norvège	Stérilisateur d'instruments	1	
1983	Constituyentes (Argentine)	Réacteur de recherche	1	
1984	Maroc	Source de radiographie perdue		8
1986	Tchernobyl (URSS)	Centrale nucléaire	29	
1987	Goiânia (Brésil)	Source de téléthérapie détournée		4
Total: 17 accidents, 59 décès			40	19

^a Dans des installations nucléaires et des établissements non nucléaires des secteurs de l'industrie, de la recherche et de la médecine (à l'exclusion des cas de malades en traitement).

dans les premiers temps de l'ère atomique; nombre d'entre eux étaient des accidents de criticité, dont plusieurs dans des réacteurs expérimentaux. Alors que la fréquence des accidents radiologiques dans les installations nucléaires a beaucoup diminué au fil des ans, celle des accidents de ce type survenant ailleurs a augmenté et plusieurs d'entre eux ont touché des membres du public; certains ont même été mortels, car les sources radioactives intenses qui en étaient la cause ont échappé à tout contrôle et, n'ayant pas été identifiées comme telles, ont fini entre les mains de personnes non averties.

«Dans son ensemble, la situation est simple et bien documentée, encore que certains accidents radiologiques graves, tels les radiodermites des mains dont souffrent les radiologues professionnels, n'aient pas été signalés, et que, dans cette mesure, des informations qui auraient été utiles pour prévenir des accidents similaires font défaut. Par rapport au nombre annuel des décès dus à d'autres types d'accidents du travail, les décès imputables à des radioexpositions accidentelles signalés dans le monde entier au cours des 40 dernières années ne sont pas nombreux [voir le tableau VIII]. Le bilan de sûreté relativement satisfaisant des applications des rayonnements n'est cependant pas une raison pour se reposer sur ses lauriers, surtout si l'on peut prendre des mesures efficaces et pratiques pour réduire le risque d'accidents.»

Appendice IV

CONCLUSIONS DE LA CNEN

La CNEN a tiré de l'accident de Goiânia les conclusions ci-après:

- 1) Les conséquences d'un accident radiologique avec contamination due à la rupture d'une source radioactive peuvent s'aggraver si l'on tarde beaucoup à le découvrir.
- 2) En cas d'accident, les propriétés physiques et chimiques de la source radioactive sont des facteurs importants. Les fiches techniques des sources scellées devraient préciser ces propriétés, dont il faudrait tenir compte dans les conditions des autorisations délivrées aux fabricants, en signalant les conséquences possibles d'un accident ou d'un mauvais usage.
- 3) Il est essentiel de prévoir des moyens d'information appropriés pour éviter la panique parmi la population. D'une façon générale, le public devrait être informé de la nature des rayonnements et de leurs applications. Une brochure expliquant les termes et unités spéciaux du domaine radiologique devrait être mise à la disposition des médias. En cas d'urgence radiologique, il faudrait constituer un groupe chargé d'informer l'assemblée législative, les écoles, les églises, les collectivités, etc., ainsi que la presse. Le personnel affecté à la décontamination et au traitement des victimes devrait recevoir des instructions sur la manière de communiquer l'information en termes compréhensibles pour la population. Les contacts de ce personnel avec les individus touchés par l'accident de Goiânia se sont révélés très importants: les gens jugent de la gravité de la contamination d'après les réactions du personnel des équipes de secours. Les personnes les plus affectées par l'accident se persuadaient que leur logement était réellement décontaminé lorsque le personnel de la CNEN acceptait le verre d'eau ou la tasse de café qu'on lui offrait.
- 4) Il conviendrait de mettre en place un dispositif efficace d'aide sociale et psychologique à la suite d'un accident radiologique causant une grave contamination. L'appui psychologique devrait être fourni aux personnes directement ou indirectement touchées par l'accident et au personnel d'intervention. Des psychologues devraient être disponibles pour donner des conseils, se joindre au groupe chargé de prendre les décisions d'urgence et de planifier l'intervention, et évaluer, le cas échéant, le degré de tension nerveuse des victimes.
- 5) L'efficacité de l'assistance internationale dépend de l'infrastructure du pays où l'accident s'est produit. Des cours de formation à l'intervention d'urgence devraient avoir lieu dans les pays en développement et dans les pays

développés bien équipés. En général, ces cours traitent de l'intervention de puissants organismes à la suite de situations d'urgence dont les conditions sont connues d'avance. Or, les circonstances sont très différentes dans beaucoup de pays: le matériel est distinct, le climat est défavorable et les habitudes de gestion ne sont pas les mêmes.

- 6) Des moyens de premiers secours aéroportés devraient être disponibles à tout moment.
- 7) Les organisations internationales compétentes devraient tenir un fichier du matériel de contrôle radiologique disponible. Elles pourraient également envisager d'avoir une réserve de matériel prêt pour l'expédition. Les règlements douaniers devraient être modifiés de façon à faciliter l'importation et la réexportation du matériel et des équipements nécessaires. Il serait peut-être bon de créer, dans toutes les parties du monde, des centres régionaux de secours en cas de situation d'urgence.
- 8) Les appareils devraient pouvoir être adaptés pour supporter les conditions régnant sur le terrain et fonctionner dans des conditions extrêmes de température et d'hygrométrie et dans un environnement instable. Le personnel maniant ces appareils devrait savoir comment déterminer les débits de dose, sans ambiguïté et pour une vaste gamme de doses, être à même de choisir le matériel le mieux adapté à la situation et connaître les caractéristiques d'étalonnage de ce matériel.
- 9) Il faudrait tenir à jour la liste du personnel disponible par spécialité et, en cas d'urgence, pouvoir se mettre en rapport avec des spécialistes des divers domaines d'intervention pour qu'ils viennent à l'aide des équipes locales de radioprotection. Ces spécialistes devraient être en mesure de donner des conseils aux décideurs et des avis sur les actions à entreprendre, et de participer à toutes les tâches indispensables. L'expérience acquise à Goiânia montre que les rapports censés être les «meilleurs» avaient été en fait rédigés par des spécialistes qui n'avaient pas participé aux opérations.
- 10) Il faut absolument prévoir un site de stockage provisoire des déchets à proximité de la zone touchée. Tout retard dans le choix du site, qui dépend généralement d'une décision politique, risque de favoriser la dispersion des matières radioactives dans l'environnement.
- 11) Une équipe de génie civil doit être disponible pour prendre part aux opérations de décontamination.
- 12) Pour les prises de décisions et l'organisation des équipes d'intervention à la suite d'un accident radiologique, il faut définir une hiérarchie bien précise. L'attribution des responsabilités dans le processus de décision, de la planification à l'action et à l'évaluation des conséquences, devrait être très claire, et chaque groupe devrait être au fait de sa fonction. Si possible, chaque équipe devrait être constituée autour d'un chef qui la dirige dans des conditions de travail normales.

- 13) Dans la plupart des cas, il importe de prévoir un programme d'inspection des matériels et installations de radiologie, mais ce programme ne peut être efficace que si lui est associé un moyen de coercition qui pourrait consister, par exemple, à canaliser la responsabilité civile ou professionnelle dans l'autorisation d'utiliser la source.

Annexe I

MATERIEL DE CONTROLE RADIOLOGIQUE

La présente annexe contient la liste détaillée du matériel de mesure et de contrôle radiologique utilisé à la suite de l'accident de Goiânia, ainsi que les appréciations des spécialistes qui ont supervisé son emploi et leurs observations à ce sujet. Le tableau IX donne ces appréciations sur les qualités des débitmètres de doses et le tableau X sur celles des contaminamètres.

Observations

En se fondant sur son expérience du matériel, l'équipe de la CNEN a fait les observations suivantes:

- 1) Pour protéger les détecteurs contre les conditions ambiantes, notamment la contamination radioactive et la pluie, il a fallu les envelopper dans des sacs en plastique. Ces emballages n'ont pas facilité la lecture des valeurs ni le maniement des appareils en général.
- 2) Les câbles des appareils équipés de sondes télécommandées ont posé des problèmes incessants. Si on a souvent pu les réparer, il a fallu néanmoins se procurer un stock important de câbles de rechange.
- 3) On a constaté qu'il était très utile d'équiper les contaminamètres d'une signalisation audible, mais en présence de la population (notamment lors du contrôle des maisons), il a fallu la déconnecter car le déclic audible l'inquiétait.
- 4) On s'est aperçu que les compteurs proportionnels et les chambres d'ionisation étaient sensibles aux conditions d'hygrométrie extrêmes et donc moins utiles que d'autres détecteurs. Les chambres d'ionisation étaient aussi sensibles aux conditions de température extrêmes.
- 5) Le matériel à affichage numérique s'est révélé sensible aux conditions de température; en outre, il était difficile de faire les lectures en plein soleil, notamment lorsque les détecteurs étaient emballés dans leurs sacs en plastique.
- 6) La pluie (souvent forte) a infiltré les parties télescopiques des Teletectors, qu'il a fallu sécher à l'aide d'un sèche-cheveux.
- 7) On a alimenté les compteurs proportionnels avec du gaz pour briquet. Malheureusement, en raison de la qualité médiocre du gaz disponible au Brésil, les compteurs se sont encrassés et il en est résulté un nombre élevé de pannes.
- 8) Les temps de réponse de certains détecteurs étaient lents; cette caractéristique s'est révélée importante aux derniers stades de l'intervention après l'accident, durant lesquels prédominaient de faibles débits de dose et niveaux de contamination.
- 9) Ultérieurement, on a pu se procurer des débitmètres de dose à scintillation, conçus pour des études géologiques, dont la plage de mesure s'étendait jusqu'au niveau du fond de rayonnement et le temps de réponse était très rapide. Ils se sont révélés très utiles pour

TABLEAU IX. EVALUATION DES QUALITES DES DEBITMETRES DE DOSE

Type	Nombre	Robustesse	Résistance aux conditions extrêmes	Réponse	Nombre de pannes ou de réparations
Tubes GM	27	Très bonne	Très bonne	Très bonne	3
Compteurs proportionnels	2	Très bonne	Acceptable	Excellente	1
Chambres d'ionisation	16	Très bonne	Acceptable	Mauvaise pour les faibles valeurs	1
Telectors (télescopiques)	7	Très bonne	Acceptable	Excellente	1
Telectors (articulés)	3	Très bonne	Très bonne	Bonne	0

TABLEAU X. EVALUATION DES QUALITES DES CONTAMINAMETRES

Type	Nombre	Robustesse	Résistance aux conditions extrêmes	Réponse	Nombre de pannes ou de réparations
Tubes compteurs GM à fenêtre en bout	11	Très bonne	Très bonne	Excellente	3
Compteurs proportionnels	7	Faible	Bonne	Excellente	5
Tubes compteurs GM à fenêtre latérale	2	Très bonne	Très bonne	Correcte	0
Détecteurs à scintillation	3	Très bonne	Très bonne	Très bonne	0

repérer rapidement des petits points chauds. Pour témoigner de l'intérêt de la vitesse de réponse, on peut citer le cas d'une balle de papier contaminée qui a été décelée sur un camion roulant à 60 km/h. Ces débitmètres étaient si sensibles qu'ils ont pu aussi être utilisés comme contaminamètres dans certaines circonstances.

- 10) Le personnel du groupe qui a agi pendant la phase initiale de l'intervention avait l'expérience des techniques de contrôle radiologiques, mais a dû ensuite utiliser du matériel dont il ne connaissait ni les caractéristiques ni les conditions d'emploi. Par ailleurs, à mesure que les travaux avançaient, il a fallu engager en grand nombre du personnel de radioprotection dont l'expérience pratique du contrôle était mince. Il a donc fallu enseigner certains rudiments. Des problèmes ont néanmoins surgi en raison de l'adoption de différents protocoles de mesure.

Annexe II

RECOMMANDATIONS POUR LE RENVOI DES PATIENTS CHEZ EUX

Protocole adopté par les autorités brésiliennes pour le renvoi chez eux des patients hospitalisés, porteurs d'une contamination interne due à l'absorption de césium 137 et fondé sur les critères relatifs à la seule protection d'autrui et de l'environnement contre les rayonnements

Limites recommandées

Il est recommandé qu'une anthroporadiométrie et une collecte des urines de 24 heures soient effectuées sur les personnes susceptibles d'être porteurs d'une contamination interne et les patients qui le sont. Il est en outre recommandé de ne renvoyer chez eux que les personnes dont les niveaux de radioactivité interne sont inférieurs aux valeurs selon l'âge indiquées dans le tableau XI et dont l'urine contient une radioactivité moyenne inférieure à $15 \text{ kBq} \cdot \text{L}^{-1}$ ($0,4 \mu\text{Ci} \cdot \text{L}^{-1}$).

Fondement théorique

La limite fixée pour le rejet de césium 137 dans le réseau d'assainissement conformément à la norme brésilienne CNEM-ME-6.05 (Rejets radioactifs des installations radiologiques, 1985) est de $0,4 \mu\text{Ci} \cdot \text{L}^{-1}$ ($15 \text{ kBq} \cdot \text{L}^{-1}$). En fait, la limite est donc la quantité qui, une fois diluée dans le volume moyen d'eaux usées évacuées chaque jour par l'installation, aboutirait à une concentration moyenne de $0,4 \mu\text{Ci} \cdot \text{L}^{-1}$.

Il est suggéré que cette limite de $0,4 \mu\text{Ci} \cdot \text{L}^{-1}$ soit appliquée à la radioactivité de l'urine comme critère pour renvoyer chez eux les patients porteurs d'une contamination interne. Cette limite ne tient pas compte de la dilution de l'urine dans les appareils et canalisations sanitaires.

Il a été prouvé que le Radiogardase^R (bleu de Prusse) a pour effet maximal de provoquer un taux d'excrétion fécale du césium de plus du triple du taux d'excrétion urinaire, c'est-à-dire qu'à un taux d'excrétion urinaire de $15 \text{ kBq} \cdot \text{L}^{-1}$ pourrait correspondre un taux de $45 \text{ kBq} \cdot \text{L}^{-1}$ ou plus dans les selles. Néanmoins, dans le cas des matières fécales, il faut tenir compte de la dilution dans l'installation sanitaire. Dans ce cas, le volume du diluant serait de 4 L au moins. C'est pourquoi à ce niveau de radioactivité les matières fécales peuvent être rejetées dans le réseau d'assainissement sans que soit dépassée la limite fixée pour les rejets radioactifs.

Les limites suggérées pour la radioactivité due à la présence de césium 137 dans l'organisme sont suffisamment faibles pour que les personnes chez qui elles ne sont pas dépassées ne présentent pas de risque d'irradiation externe pour autrui.

Dans le tableau XII figurent les débits de dose au contact et à 0,3 m d'un cylindre, qui contient la quantité de radioactivité indiquée au tableau XI et uniformément répartie, les dimensions du cylindre étant adaptées pour la modélisation selon le groupe d'âge correspondant.

TABLEAU XI. RADIOACTIVITE INTERNE MAXIMALE POUR LES PATIENTS RENVOYES CHEZ EUX, SELON L'AGE ET LE TEMPS ECOULE DEPUIS L'INCORPORATION DE CESIUM 137 — SUGGESTIONS

Temps écoulé depuis l'incorporation (en jours)	Radioactivité interne maximum (μCi) ^a					
	Nourrisson	Un an	Cinq ans	Dix ans	15 ans	Adulte
15	4,4	4, 2	8,1	19,2	51,8	105,4
30	4,4	4,2	10,2	28,9	60,0	110,7
45	4,4	4,4	11,8	34,4	69,0	110,7
60	4,4	4,6	12,8	36,4	69,0	110,8
75	4,4	4,7	13,3	37,0	69,0	110,7
90	4,4	4,8	13,5	37,2	69,0	110,7
105	4,4	4,9	13,6	37,3	69,0	110,7
120	4,4	4,9	13,7	37,3	69,0	110,7
135	4,4	5,0	13,7	37,3	69,0	110,8
150	4,4	5,0	13,7	37,3	69,0	110,8
165	4,4	5,0	13,7	37,3	69,0	110,8
180	4,4	5,1	13,7	37,3	69,0	110,8
240	4,5	5,7	13,7	37,3	69,0	110,8
300	4,5	4,1	13,7	37,3	69,0	110,7
360	4,4	0,79	13,9	37,3	69,0	110,7

^a 1 μCi = 37 kBq.

TABLEAU XII. DEBIT D'EXPOSITION CORRESPONDANT A LA RADIOACTIVITE INTERNE MAXIMALE INDIQUEE AU TABLEAU XI

Radioactivité interne (μCi) ^a	Débit d'exposition ($\text{mR} \cdot \text{h}^{-1}$) ^b	
	Au contact du cylindre	A 0,3 m
<i>Nourrisson</i>		
4,4	0,13	0,008
<i>Un an</i>		
4,2	0,05	0,005
4,4	0,05	0,005
4,6	0,06	0,006
4,7	0,06	0,006
4,8	0,06	0,006
4,9	0,06	0,006
5,0	0,06	0,006
5,1	0,06	0,006
5,7	0,07	0,007
4,1	0,05	0,005
0,79	0,01	0,001
<i>Cinq ans</i>		
8,1	0,04	0,007
10,2	0,05	0,008
11,8	0,06	0,010
12,8	0,07	0,011
13,3	0,07	0,011
13,5	0,07	0,011
13,6	0,07	0,011
13,7	0,07	0,011
<i>Dix ans</i>		
19,2	0,06	0,011
28,9	0,09	0,017
34,4	0,10	0,020
36,4	0,11	0,021
37,0	0,11	0,021
37,2	0,11	0,021
37,3	0,11	0,021
<i>15 ans</i>		
51,8	0,09	0,021
60,0	0,10	0,024
69,0	0,12	0,028

TABLEAU XII. (suite)

<i>Adulte</i>		
105,4	0,13	0,034
110,7	0,14	0,036
110,8	0,14	0,036

^a 1 μCi = 37 kBq.

^b 1 mR = 0,258 $\mu\text{C} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Annexe III

PROTECTION RADIOLOGIQUE

Mesures de protection dans les installations médicales

La plupart des patients, admis du fait de l'accident à l'Hôpital général de Goiânia et surtout à l'Hôpital naval Marcilio Dias de Rio de Janeiro, étaient porteurs de quantités significatives de contamination interne, ce qui a donné lieu à une irradiation externe et à de sérieux problèmes de contamination. Ainsi, les débits de dose gamma enregistrés à proximité des patients à leur arrivée à l'hôpital allaient de $10 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$ à $15 \text{mSv} \cdot \text{h}^{-1}$ (près des blessures contaminées). Il a donc fallu associer aux soins médicaux prioritaires un vaste programme de surveillance radiologique et de radioprotection. On a dû mettre en place, dans les salles d'hôpital, des zones contrôlées, avec barrières et procédures de travail spéciales, et prévoir une installation de décontamination séparée.

De toute évidence, une surveillance des excréments par biodosage s'imposait. Allant jusqu'à $30 \text{MBq} \cdot \text{L}^{-1}$ (pour l'urine) et $75 \text{MBq} \cdot \text{L}^{-1}$ (pour les selles), le niveau de radioactivité des échantillons posait un problème de contamination, tant à l'hôpital qu'au laboratoire (voir 6.1). Toutefois, plus important du point de vue de la radioprotection était le césium 137 rejeté avec la sueur des patients. Bien que régulièrement décontaminés, ces derniers constituaient en effet des sources de contamination mobiles qui se régénéraient.

On mesurait régulièrement la contamination pour déterminer s'il fallait ou non décontaminer et, lorsque cela était acceptable du point de vue médical, les patients se douchaient eux-mêmes pour se décontaminer. Les principales valeurs concernant les niveaux de contamination radioactive dans les zones contrôlées ont été enregistrées. Des variantes dans les protocoles de mesure rendent difficile l'interprétation des résultats, mais des niveaux de 10^5 à $10^6 \text{Bq} \cdot \text{m}^{-2}$ ont été fréquemment constatés dans ces zones. Par crainte d'une éventuelle remise en suspension, la radioactivité de l'air a également été surveillée dans certaines salles de l'Hôpital naval Marcilio Dias, mais les niveaux d'activité enregistrés étaient faibles. L'eau et les déchets solides ont également été contrôlés.

Dans la mesure du possible, les sols et les murs ont été couverts de feuilles de plastique pour faciliter la décontamination. Au bout d'une semaine environ, on a constaté qu'il fallait changer certaines procédures de travail. Il a fallu suivre des procédures particulières pour l'autopsie des quatre patients décédés.

Deux équipes de quatre personnes chacune, se relayant toutes les 12 heures, étaient nécessaires à l'Hôpital naval pour veiller à la radioprotection dans les salles et assurer le contrôle des accès et la surveillance radiologique du personnel et des déchets. Quatre autres personnes s'occupaient de la décontamination des zones et des vêtements et de l'organisation des transports et des déplacements des patients.

L'exposition du personnel pénétrant dans la zone contrôlée était mesurée au moyen de dosimètres photographiques et de stylodosimètres dans la plupart des cas, et de dosimètres d'extrémités en cas de contact avec des patients. Durant l'hospitalisation de ces derniers, les doses d'exposition professionnelle n'ont jamais excédé 5mSv .

Mesures de protection à Goiânia

Les actions correctrices entreprises à Goiânia comportaient un risque certain d'irradiation professionnelle, tant interne qu'externe, et nécessitaient donc l'emploi de moyens destinés à limiter cette irradiation. Les principes et les procédures qui ont été appliqués sont ceux qui le sont dans la plupart des établissements où le même risque existe. Cela dit, les circonstances étaient inhabituelles: conditions environnementales extrêmes, installations non conçues pour des utilisations radiologiques. Il fallait donc faire preuve de pragmatisme et allier disponibilité d'esprit et connaissance solide du domaine de la protection radiologique.

Des débits de dose de l'ordre de dizaines de millisieverts par heure, et parfois même supérieurs à $1,0 \text{ Sv} \cdot \text{h}^{-1}$, ont été enregistrés en de nombreux points des principaux foyers de contamination. Il a fallu organiser le travail dans ces zones pendant la décontamination, les doses prévues imposant souvent des limites de temps. Pour faciliter cette organisation et la limitation des doses, on a fixé des limites de dose autorisées pour différents espaces de temps:

- 1,5 mSv par jour;
- 5,0 mSv par semaine;
- 15,0 mSv par mois;
- 30,0 mSv par trimestre.

Les doses professionnelles ont été mesurées à l'aide de dosimètres photographiques, mais le contrôle continu a surtout été assuré par les lectures quotidiennes des stylodosimètres. On en a utilisé au total 450 (75 avaient été envoyés par l'AIEA, 221 par la France). Le problème posé par les conditions extrêmes d'hygrométrie ambiante a été compliqué par le fait que les appareils étaient portés entre deux couches de vêtement et se déchargeaient donc facilement si l'on ne prenait certaines précautions. A cet égard, il est important, dans les plans d'intervention, de prévoir la fourniture de dosimètres à lecture directe pouvant fonctionner dans les conditions ambiantes des accidents.

La lutte contre la contamination a causé les plus grandes difficultés, car elle a exigé le port de vêtements de protection et l'adoption de bonnes pratiques de travail. Puisque les conditions ambiantes interdisaient le port de combinaisons jetables, on a eu recours à des combinaisons en tissu pour lesquelles il a fallu installer une laverie, si rudimentaire fût-elle. Grâce à la supervision, à la formation et au recours à des procédures écrites, le travail s'est fait selon de bonnes pratiques. La formation s'est avérée particulièrement nécessaire puisque, comme ce serait probablement le cas pour tout accident grave éventuel, la main d'oeuvre employée comprenait beaucoup d'ouvriers qui (environ les deux tiers à Goiânia) n'avaient jamais, ou presque jamais, travaillé sous rayonnements. Même parmi les cadres, nombreux étaient ceux qui n'avaient aucune expérience pratique et avaient besoin d'une formation.

Surveillance radiologique du personnel

Irradiation externe

Au total, 755 travailleurs ont participé d'une façon ou d'une autre à l'intervention qui a suivi l'accident de Goiânia. Ils ont été employés aux dépôts de ferraille I, II et III, dans la Rua 57 où l'enveloppe de la source a été brisée, dans les endroits où des balles de papier

contaminées ont été trouvées, au site de stockage des déchets, à l'Hôpital des maladies tropicales, dans d'autres hôpitaux de Goiânia et à l'Hôpital naval Marcilio Dias à Rio de Janeiro. Différents groupes ont été affectés aux tâches suivantes: dosimétrie et entretien des appareils, administration, décontamination, habitations, recherche de nouvelles zones contaminées et enregistrement des doléances du public.

Sur ces 755 travailleurs, seuls 262 avaient été employés auparavant ou avaient reçu une formation dans le domaine de la radioprotection. Les autres ont été recrutés parce qu'ils avaient travaillé sous rayonnements ionisants de façon sporadique ou en raison de leur spécialité (par exemple: dosimétrie).

Pour tous les travailleurs, la dosimétrie individuelle a eu recours aux dosimètres photographiques que l'on changeait à la fin de chaque mois ou de chaque période de travail. Les films ont été envoyés à l'Institut de radioprotection et de dosimétrie (IRD) à Rio de Janeiro et les résultats fournis à un centre de coordination, à Goiânia.

Restreint au départ à un très petit groupe, le port de stylodosimètres s'est élargi par la suite à 450 personnes. Les indications des stylos ont été relevées tous les jours. Tous les matins, les travailleurs mettaient leurs deux stylodosimètres (0-200 mR et 0-5 mR). A la fin de la journée, les doses étaient inscrites sur des fiches individuelles où figurait aussi la mention de la zone de travail. Tous les jours, les fiches étaient traitées par ordinateur à l'aide d'un programme de compilation des données.

Les dosimètres photographiques provenaient de l'IRD. Les stylodosimètres avaient été expédiés par divers laboratoires et certains étalonnés par l'expéditeur (plus de la moitié l'ont été à l'IRD). Pour les besoins de la vérification, chaque jour huit stylodosimètres étaient choisis au hasard et exposés à du césium 137 pendant la nuit. Le lendemain matin, les valeurs qu'ils indiquaient étaient relevées, ainsi que la variation. Tout appareil qui présentait plus de 20% d'erreur était alors retiré du circuit.

Les valeurs des doses cumulées enregistrées chez 583 des 755 travailleurs entre le 30 septembre et le 21 décembre 1987 indiquent que 67,6% d'entre eux avaient reçu des doses inférieures à 1 mSv et qu'en aucun cas les doses n'avaient dépassé 16 mSv, soit moins que la limite trimestrielle de 30 mSv autorisée par la CNEN pour cet accident. La dose moyenne a été déterminée pour chaque groupe affecté à une tâche donnée. La valeur la plus élevée, soit 4,7 mSv pour trois mois, a été trouvée chez le groupe affecté à la décontamination des foyers principaux.

Contamination interne

La contamination interne de 194 personnes ayant participé à l'intervention a été mesurée à l'aide de l'anthroporadiamètre de l'IRD. Trente-huit d'entre elles étaient porteuses d'une activité interne supérieure au minimum décelable (74 Bq pour un temps de comptage de 30 min). L'activité interne la plus élevée était de 2,0% 0,3 kBq, ce qui correspond à un équivalent de dose engagé d'environ 10 mSv.

Exposition du public

Les recherches radiométriques et les estimations de l'irradiation externe montrent que, dans les sites dits foyers de contamination, les expositions du public ont été les suivantes:

- a) *Près des foyers*
- Pour la maison située derrière le 68 de la Rua 57, on a obtenu des estimations de la dose externe comprises entre 0,08 et 0,12 Sv (compte tenu du temps écoulé entre la rupture de la source et la fermeture de la zone). Cinq personnes vivaient dans cette maison.
 - Pour les maisons adjacentes de la Rua 57, les estimations de la dose externe intégrée sont comprises entre 0,8 mSv et 0,012 Sv;
 - Au voisinage des autres foyers principaux, les estimations de la dose externe intégrée sont comprises entre 0,2 et 9 mSv.
- b) *Sites éloignés*
- A Anapolis, trois maisons avaient des points chauds avec un débit allant jusqu'à $250 \text{ mR} \cdot \text{h}^{-1}$ ($1 \text{ R} = 258 \mu\text{C} \cdot \text{kg}^{-1}$), et dans trois autres, à Aparecida de Goiânia, le débit en certains points allait jusqu'à $30 \text{ mR} \cdot \text{h}^{-1}$. Ces maisons sont des cas particuliers car elles avaient accueilli des gens ayant eu un contact direct avec du césium 137.
- c) *Dans les rues*
- Les estimations de la dose intégrée pour cette période sont comprises entre 1,12 et 1,73 mSv.
- d) *Transport des restes du barillet*
- L'intérieur du bus dans lequel M.F.1 et G.S. ont voyagé avec les restes du barillet entre le dépôt de ferraille III (Rua P.19) et la Vigilância Sanitária (Rua 16A) a été reconstitué. Cette reconstitution a permis d'estimer la dose maximale qu'un passager hypothétique placé dans la position la plus défavorable par rapport à la source aurait reçue en 15 minutes, soit la durée maximale estimée du voyage. Il a été calculé que cette dose n'aurait pas été supérieure à 0,3 Sv aux jambes. A une distance de 1,40 m de la source, ce chiffre serait tombé à 0,04 Sv, compte non tenu de tout autre éventuel obstacle au faisceau.
- e) *Vigilância Sanitária*
- Des recherches ont été faites pour identifier les employés de Vigilância Sanitária qui auraient pu être en contact direct avec la source ou dans le voisinage de la cour où les restes du barillet ont été déposés le 28 septembre.
- De ces informations, il a été conclu que de nombreuses personnes pouvaient avoir été exposées. Parmi ces personnes, seules quatre d'entre elles avaient reçu des doses mesurables estimées par analyse cytogénétique, à savoir 0,2 Gy, 0,3 Gy, 0,5 Gy et 1,3 Gy. La contamination interne n'était décelable que chez une personne qui était porteuse de 0,74 GBq. Ces quatre personnes sont suivies de près par les médecins radiologues de la CNEN et les médecins du Ministère de la santé de l'Etat de Goiás qui procèdent régulièrement à une évaluation clinique et analytique.
- Moins de 1000 personnes avaient reçu des doses dues à une irradiation externe supérieures à la dose due à l'exposition au rayonnement naturel pendant un an. La reconstitution préliminaire de la situation basée sur la quantité de césium présente dans ces lieux permet d'affirmer que plus de 97% des personnes de ce groupe ont été exposées à des doses comprises entre 0,2 Sv et 0,01 Sv.
- Du 30 septembre au 22 décembre, l'antenne de la CNEN au stade olympique de Goiânia a contrôlé environ 112 000 personnes, dont 249 ont été trouvées porteuses d'une contamination interne ou externe. Chez 129, la contamination était à la fois interne et externe. Les biodosages et l'anthroporadiamètre installé par la CNEN à Goiânia ont donné les résultats indiqués au tableau XIII.

TABLEAU XIII. DOSES REÇUES LORS DE L'ACCIDENT DE GOIÂNIA

Nombre de personnes	Dose engagée (70 ans) (Sv)
45	<0,005
42	0,005-0,05
33	0,05-1,0
4	1-2
2	2-3
1	3-4
1	5-6
1	7

Finalelement, 49 personnes ont été hospitalisées. Vingt d'entre elles avaient besoin de soins médicaux intensifs. Parmi ces patients, dix se trouvaient dans un état critique, avec des complications de leur état clinique et une radiodermatite. Quatre patients sont morts et un autre a été amputé d'un bras. Les survivants ont été renvoyés chez eux après un traitement de décontamination interne et externe, et sont encore suivis médicalement.

Annexe IV

DECONTAMINATION CHIMIQUE

(Le texte suivant est une récapitulation de notes techniques communiquées par des spécialistes brésiliens sur les procédés de décontamination chimique employés après l'accident de Goiânia. Une description technique plus détaillée de ces procédés devrait être publiée.)

Contamination par le césium à Goiânia: aspects chimiques

On examinera le mécanisme de la contamination par le césium avant les méthodes de décontamination. Le chlorure de césium 137, extrait de l'enveloppe de la source (où il est mélangé à une matrice), est soluble dans l'eau et les milieux ou couches aqueux. La cristallinité du chlorure de césium est faible et sa solubilité dans l'eau est très élevée (environ 2 kg par litre d'eau, à 30°C). Les ions $(Cs^+)_{aq}$ sont légèrement plus petits que les ions $(K^+)_{aq}$ et se substituent facilement à ces derniers dans les composés de faible solubilité, tels que les silicates et les échangeurs d'ions, minéraux ou organiques. Ces processus impliquent des équilibres thermodynamiques et, bien que les composés de Cs^+ à anion volumineux soient moins solubles que les composés de K^+ et que les ions Cs^+ se substituent facilement à tous les ions alcalins dans les échangeurs d'ions, les ions Cs^+ peuvent parfois être déplacés par des ions K^+ , voire par des ions Na^+ .

Ce sont surtout les personnes et les animaux, les sols (plusieurs matériaux silicatés, essentiellement l'argile, un silicate double feuilleté possédant des propriétés d'échangeur d'ions, notamment d'ions Cs^+), les solutions aqueuses, le béton et le ciment qui ont été touchés par le transport d'ions Cs^+ et la contamination.

Le chlorure de césium d'origine, une fois hydraté, a libéré des ions Cs^+ , qui ont été absorbés par la peau des personnes touchées, par les couches aqueuses des sols et par les bâtiments. (Ce phénomène peut être appelé «contamination primaire».) Dans les sols, il y a eu échange d'ions et les ions Cs^+ ont été fixés par les silicates de l'argile, comme ils l'ont été par les silicates du béton et du ciment.

Des gens ont été très gravement touchés par cette contamination primaire. Les ions Cs^+ ont traversé la peau pour atteindre les muscles et le sang. Dans certains cas, le césium a été ingéré, et les ions Cs^+ sont passés directement dans l'estomac et les intestins, puis dans le sang.

Des processus secondaires ont eu pour origine le sol contaminé: des gens et des animaux, ainsi que l'eau de pluie ont fait pénétrer une contamination dans les bâtiments, ce qui a provoqué un transfert d'ions Cs^+ par des mécanismes concurrents. Le sol contaminé a produit de la poussière qui s'est déposée avec des ions Cs^+ sur la peau, les bâtiments, les toits, etc. Là, sous l'action de couches aqueuses ou d'eau de pluie, des réactions d'équilibre ont provoqué une contamination secondaire. En inhalant l'air contaminé par la poussière, les gens ont été affectés autrement par la contamination secondaire.

Une partie non négligeable de la contamination primaire et secondaire est due à des personnes et des animaux porteurs de la source d'origine dont la transpiration, l'urine, la salive et les selles ont véhiculé des ions Cs^+ . Ces porteurs ont transmis des ions Cs^+ sous une forme très soluble, qui ont été absorbés plus intensivement que lorsqu'ils avaient été transportés par le sol ou la poussière. Cette contamination a réagi beaucoup plus fortement avec le ciment, le béton, les revêtements de peinture, les matières organiques synthétiques et les résines phénoliques. Certains enduits à l'huile contiennent du bleu de Prusse utilisé comme pigment, qui a la propriété connue de fixer fortement les ions Cs^+ par échange avec des ions K^+ (ou des ions Fe^{3+} , quoique moins spontanément).

Travaux expérimentaux préliminaires

Le Laboratoire d'analyse minérale de l'IRD a fait des travaux d'analyse chimique et une étude de la cinétique de l'extraction d'ions Cs^+ par des ions ferrocyanure (bleu de Prusse), $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ en suspension, en vue de la décontamination par lavage des personnes admises à l'Hôpital naval Marcilio Dias. Une suspension de bleu de Prusse à 0,5% donnait une rétention de 99,9% d'ions Cs^+ par échange avec des ions K^+ . Le produit (du Laboratoire pharmaceutique de Marinha, Rio de Janeiro) était du ferrocyanure de potassium $\text{K} \cdot \text{Fe} \cdot \text{Fe}(\text{CN})_6$ (appelé PBK), dont la solubilité est inférieure à 10^{-12} . Par contre, les essais avec du bleu de Prusse du commerce utilisé comme pigment n'ont donné que 30% de rétention. D'autres études ont été faites ensuite avec le bleu de Prusse sur la sorption et la désorption du césium 137 dans des sols à haute teneur en argile, sur la décontamination des urines et des déchets liquides et sur des réactifs pour la décontamination des personnes.

Sorption et désorption dans le sol

On a fait circuler de l'urine contenant du césium 137 dans des colonnes d'un litre de sol semblable à celui de Goiânia (en menant parallèlement plusieurs expériences). On a proposé de recourir à l'alun potassique et au ciment Portland en suspensions pour fixer les ions Cs^+ sur des sols semblables à celui de la cour de R.A., où restaient peut-être 18 TBq (500 Ci). Les essais ont fait apparaître que les solutions d'alun (contenant des ions K^+ , Al^{3+} et SO_4^{2-}) éliminaient entièrement les ions Cs^+ par échange avec des ions K^+ et par durcissement des minéraux argileux. La meilleure rétention a été obtenue par précipitation avec PBK. (On a renoncé à utiliser de la kaolinite, car les suspensions de ce produit sont filtrées par le sol, ralentissent la percolation et fixent moins bien le césium.)

Décontamination de l'urine et des déchets liquides

Au cours d'essais d'échangeurs d'ions, on a extrait très efficacement le césium 137 avec un acide fort et des résines cationiques chargées de PBK, même en présence de fortes concentrations d'ions Na^+ , Ca^{2+} et Al^{3+} . Les résines anioniques chargées de PBK étaient moins efficaces. Dans les hôpitaux de Goiânia et lors des travaux de décontamination, on a utilisé des colonnes d'un litre ($\approx 5 \text{ cm} \times 0,5 \text{ m}$) en chlorure de polyvinyle (CPV).

Produits utilisés pour la décontamination externe des personnes

On a appliqué sur la peau des crèmes et des gels contenant des échangeurs d'ions. Les ions Cs^+ déposés à la surface de la peau et qui pénètrent dans l'organisme par transfert et par réaction chimique sont remplacés par des ions Na^+ , H^+ et K^+ selon l'échangeur utilisé: résine cationique Na^+ (RNa, du type résine de polystyrène sulfoné), résine cationique H^+ (RH) ou résine chargée de PBK (RAPK). La carboxyméthylcellulose, la glycérine et la kaolinite ont donné des crèmes compactes, pouvant facilement s'appliquer sur la peau en couches de 2 à 5 mm. RNa, qui substitue des ions Na^+ aux ions Cs^+ , était plus agréable à la peau, alors que RH, qui produit HCl sur la peau, a provoqué des irritations. RAPK était la résine la plus active (au vu de ces essais, l'Hôpital général de Goiânia a utilisé RAPK pour traiter les patients contaminés).

Travaux de décontamination chimique

Un groupe de décontamination chimique de 20 personnes a été constitué à Goiânia avec du personnel détaché de l'IRD, de l'IPEN, de l'IEN, de NUCLEBRAS, de FURNAS et de l'Université fédérale de Rio de Janeiro, avec un laboratoire de fortune dans la Rua 57. La formation sur place a porté sur le type de problèmes que ce groupe aurait à résoudre et sur le choix des procédés les mieux adaptés à chaque cas.

Selon les circonstances, dans chaque sous-groupe composé de deux à quatre personnes habituellement l'une d'elles était affectée au contrôle radiologique. Les appareils les plus largement utilisés étaient les contaminamètres de surface. On a utilisé des procédés chimiques pour décontaminer lorsque la contamination donnait lieu à des débits d'exposition pouvant atteindre $15 R \cdot h^{-1}$ ($1 R = 258 \mu C \cdot kg^{-1}$).

La liste suivante montre la diversité des objets et matériaux qu'il a fallu traiter:

- Vigilância Sanitária: sols, murs, tables, machines à écrire, chaises, béton.
- Hôpital général de Goiânia: pièces, salle de décontamination, salles de bain, sols, fenêtres.
- Hôpital des maladies tropicales: chambres, sols en céramique, salles de bain.
- Institut COOJ pour les enfants et adolescents: pièces, chaises, murs, portes, restaurants, salles de bain, piscine.
- Un bar: tables métalliques, chaises, sols en ciment.
- Bâtiment non démolé au dépôt de ferraille I: sol en béton, murs, toits, voitures, outils, machines, moteurs.
- Dépôt de ferraille II: restes du barillet (hormis l'enveloppe de la source) qui avait été enlevé de la clinique IGR, revêtement de sol en asphalte, murs voisins.
- Dépôt de ferraille III: camions, bicyclettes, pneus.
- Cour de la maison No 68, Rua 57: sol (traité avec des solutions acides d'alun, ensuite avec des serpillières de coton imprégnées de PBK, avec emploi de plaques de mousse rigide de polyuréthane doublées de plomb et fixées; durant les travaux avec les rétrochargeuses, une suspension de PBK a réduit l'entraînement des ions Cs^+ par les fortes pluies: on a décontaminé les rétrochargeuses, les camions, les outils et la rue aux jets d'eau contenant parfois HCl-Al-PBK).
- Stade olympique: salles de bain, installations sanitaires, voie asphaltée, voitures, presse à cylindre.

- Maisons privées: sols, murs, salles de bain, cuisines, fenêtres, jardins, articles ménagers, réfrigérateurs, mobilier.
- Numéros 58 et 80, Rua 57: maisons, mobilier, toits (les toits ont été nettoyés à l'intérieur avec des aspirateurs et lavés à l'extérieur avec des jets d'eau; environ 50 % de la radioactivité de surface a été enlevée par lavage; à l'intérieur, la poussière contenait 90 % de la radioactivité; les solutions radioactives ont été traitées chimiquement).
- Objets personnels ou précieux: bijoux et horloges; argent, documents et photographies; vêtements.
- Hôpital naval Marcilio Dias de Rio de Janeiro.
- Excréments des patients hospitalisés.

Méthodes de décontamination chimique

Etant donné la grande diversité des matières à décontaminer, on a mis au point plusieurs procédés de décontamination pour obtenir des résultats le plus rapidement possible, avec un minimum de destructions et de gaspillage:

- Solutions d'alun, acidifiées avec HCl (K-Al-HCl), pour les sols et murs en argile ou en ciment, et pour le sol ou les matériaux et toits contaminés par le sol (les déchets dissous ont été recueillis et traités ultérieurement).
- Solvants organiques, puis K-Al-HCl: pour la cire ou la graisse sur les sols ou les tables.
- Solutions caustiques (NaOH) contenant des détersifs, puis K-Al-HCl: pour les sols synthétiques, certaines machines, machines à écrire, objets personnels.
- Hexylène-glycol ou propylène-glycol avec HCl: pour les sols en ciment gras, objets personnels, bijoux.
- Hydrocarbures halogénés, puis solvants: pour soulever puis enlever la peinture.
- HCl et bleu de Prusse, puis alun potassique (PBK-HCl-Al): pour les sols, le béton, le ciment, l'asphalte, les papiers (photographies, documents, papier-monnaie), vêtements.
- Crèmes ou gels contenant RAPK: pour la peau et les objets délicats, tels que les meubles et les écrans de télévision.
- Acide fluorhydrique (HF), plus HCl et APK: pour les surfaces en céramique vitrifiée (cuisines, salles de bains) et les surfaces émaillées (fours, réfrigérateurs, machines à laver), le granit et d'autres matériaux silicatés.
- Jets d'eau: pour dissoudre et abraser les surfaces (des sols, toits, murs, véhicules et rétrochargeuses).
- Action mécanique et chimique (avec K-Al-HCl et PBK-HCl-Al) de brosses et de machines de polissage industriel.
- Aspirateurs et éponges en polyuréthane: pour extraire les déchets liquides de la contamination.
- Traitement chimique des solutions et suspensions avec RAPK et APK (des composés du césium surnageaient).

Traitement des excréments au laboratoire de la CNEN de Goiânia

Deux systèmes de traitement de l'urine contaminée ont été installés à Goiânia. Ils étaient constitués d'un filtre de sable additionné de charbon activé, d'un réservoir en CPV de 20 L

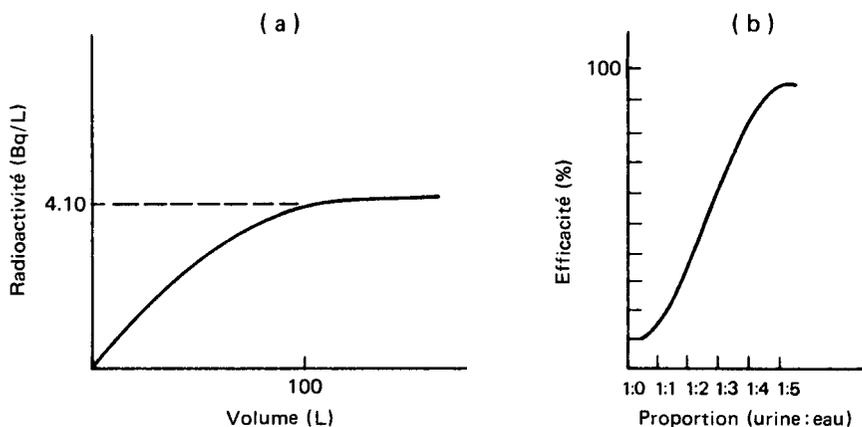


FIG. 25. a) Quantité de césium 137 retenue par un volume de résine cationique en fonction du volume d'urine diluée (1/5 d'urine pour 4/5 d'eau). b) Variation de l'efficacité de rétention du césium 137 en fonction de la dilution de l'urine (pour un débit de $6 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$).

et de deux colonnes en CPV de 1 L et de 0,5 m de long, en série, contenant des résines échangeuses de cations chargées de PBK. On a fait filtrer l'urine diluée et acidifiée à faible débit à travers les colonnes protégées par une feuille de plomb. La radioactivité et le débit de dose ont été régulièrement mesurés. Après filtration de 50 L (100 L d'une dilution par parties égales ou 100 volumes d'une colonne), le césium n'atteignait pas encore le bas de la colonne. La distribution de radioactivité a été mesurée avec un détecteur Geiger-Müller à fenêtre en plomb. La radioactivité maximale, correspondant à un débit d'exposition de $7 \text{ mR} \cdot \text{h}^{-1}$, avait son centre à 0,1 m du haut de la colonne. Lorsque l'écoulement est dirigé vers la deuxième colonne, la première est remplacée. L'urine exempte de césium est obtenue lorsque le niveau d'activité est celui du fond de rayonnement.

Les matières fécales ont été traitées par lots dans des fûts de 60 L, par dilution et réaction avec de la résine chargée de PBK pour extraire les ions Cs^+ . Les résines contaminées ont été envoyées au site de stockage et le liquide surnageant rejeté lorsque le niveau d'activité était celui du fond de rayonnement. Toutes les matières fécales recueillies dans les hôpitaux et envoyées pour analyse ont été ainsi traitées.

Déchets radioactifs produits à l'Hôpital naval Marcilio Dias

Les déchets radioactifs de nombreux types produits à l'Hôpital naval Marcilio Dias à la suite de l'accident de Goiânia englobaient le matériel de l'hôpital utilisé pour le traitement médical des patients et les excréments des personnes porteuses d'une contamination interne.

Ces déchets ont été mis à part et traités. Les matières fécales ont été mélangées à de la chaux vive et du ciment; pour l'urine, on a utilisé une résine échangeuse d'ions. Les autres types de déchets radioactifs ont été compactés ou simplement conditionnés.

Ces déchets comprenaient au total près de 3,5 tonnes de matières solides, 3 m³ d'urine et 350 kg de matières fécales, qui ont été entreposés dans une petite installation de stockage de la CNEN/IEN de Rio de Janeiro.

La radioactivité totale du césium 137 rejetée dans le réseau d'égouts entre octobre 1987 et mai 1988 a été d'environ 2×10^8 Bq.

Pour décontaminer l'urine, on a utilisé la résine cationique S 100-Lewatit. L'efficacité maximale obtenue par ce procédé a été d'environ 90%, le débit étant de 6 L·h⁻¹ et la dilution de 4/5 d'eau pour 1/5 d'urine. La figure 25 représente la courbe de saturation de la résine et la variation de son efficacité en fonction de la dilution.

D'autres objets ont été décontaminés, dans la plupart des cas, par un simple lavage à l'eau avec un détersif. Les quantités totales d'objets envoyés de l'Hôpital naval Marcilio Dias à l'IEN aux fins de décontamination pendant la période allant d'octobre à décembre 1987 se sont réparties comme suit: deux ambulances; 1000 pièces de vêtement (de protection et d'hôpital); 150 instruments chirurgicaux; 50 pièces de matériel d'hôpital; 50 objets personnels.

BIBLIOGRAPHIE

Documents établis par des auteurs brésiliens et autres documents sur l'accident radiologique de Goiânia

Pour se procurer les documents ci-après, s'adresser à la Commission nationale de l'énergie nucléaire (CNEN), Rio de Janeiro (Brésil)

MEZRAHI, A., XAVIER, A.M., Radioactive waste transport and management in Goiânia.

HEILBRON, P.F.L., Source inventory calculation.

FILHO, A.T.,^a Design and construction of the temporary repository.

FERREIRA, M.C., Monitoring in Goiânia with a mobile unit.

SILVA, C.J., DELGADO, J.V., LUIZ, M.T.B., BARROS, P.D.,^b DA CUNHA, P.G., Considerations relating to the decontamination of houses in Goiânia: limitations and implications, II General Congress on Nuclear Energy, Rio de Janeiro, avril 1988.

GODOY, J.M., GUIMARAES, J.R., GOUVEIA, V.A., ROCHEDO, E.R., Caesium-137 monitoring in water and soil near Goiânia.

AMARAL, E.C.S., VIANNA, M.E.C., GODOY, J.M., ROCHEDO, E.R., CAMPOS, H.J., OLIVEIRA, J.P., REIS, W.G., PIRES DO RIO, M.A., PEREIRA, J.C.A., ROMEIRO, C.H., RAMOS JUNIOR, A.C., Considerations relating to the decontamination of soils in Goiânia: population dose in the first year and in the long term, II General Congress on Nuclear Energy, Rio de Janeiro, avril 1988.

LIPSZTEIN, J.L., BERTELLI, L.D., MELLO, D.R., AZEREDO, A.M.G.F., JULIAO, L., SANTOS, M.S., *Internal contamination.*

NOGUEIRA, C.A., LOURENCO, M.C., DANTAS, B.M., LUCENA, E.A., Whole body monitoring.

RAMALHO, A.T., NASCIMENTO, A.C., Cytogenetic dosimetry.

BRANDAO MELO, C.E., First steps in medical care. Organization of the irradiated patients' infirmary in the Goiânia General Hospital. Clinical and analytical assessment of the patients.

FARINA, R., Measures to accelerate caesium elimination: experience acquired.

OLIVEIRA, A.R.,^c Evaluation and treatment of radiodermatitis. Medium and long term medical follow-up of the patients.

MASSINI, N.,^d PALHARES, F.,^d Legal medical aspects of the accident in Goiânia.

DA NOBREGA, A.W., Caesium retention by polyurethane foam with Prussian Blue.

MEDEIROS, J.A., DE MELO FERREIRA, A.C., DE PAULA MELO, L.T.D.V., CARVALHO, M.L.C.P., ZYLBERBERG, H., DA CUNHA, V., Caesium-137: chemical decontamination in Goiânia.

DE MELO FERREIRA, A.C., MEDEIROS, J.A., Caesium-137 decontamination of liquid and solid wastes.

NEI, C., Air monitoring during site decontamination work in Goiânia.

ROZENTAL, J.J., Chronological summary: search for contaminated sites, houses and casualties; public monitoring.

BIAGIO, R.M., TAHUATA, L., VARGAS RAMOS, E., Occupational monitoring in the accident in Goiânia.

SORDI, G.M.,^e Radiation protection: procedures and limits.

BECKER, P., Technical personnel and equipment.

BARRETTO, P., DA FONSECA, E.S., Aeroradiometric survey of the city of Goiânia after the accident with caesium-137, II General Congress on Nuclear Energy, Rio de Janeiro, avril 1988.

JANSEN., J., Infrastructure, II General Congress on Nuclear Energy, Rio de Janeiro, avril 1988.

PERES, S.S.,^f SILVA, J.J.G.,^f Management of radioactive wastes from hospitals due to the accident in Goiânia.

PERES, S.S.,^f SILVA, J.J.G.,^f Evaluation of the processes used for the treatment of radioactive hospital wastes containing caesium-137.

SILVA, J.J.G.,^f Some radiation protection aspects of the emergency in the Ferroviario district of Goiânia.

FAJARDO, P.W.,^f Radiation protection procedures at Marcilio Dias Naval Hospital during the treatment of the casualties of the radiological accident in Goiânia.

SILVA, L.H.C.,^f ROSA, R.,^f FAJARDO, P.W.,^f Radiation protection at Marcilio Dias Naval Hospital during the treatment of the casualties of the radiological accident in Goiânia.

NETO, L.B., LIPSZTEIN, J.L., Methodology for dosimetric calculations in connection with the incorporation of caesium by adults.

NETO, L.B., LIPSZTEIN, J.L., Methodology for dosimetric calculations in connection with the incorporation of caesium by children.

OLIVEIRA, C.A.N.,^g FARINA, R.,^g BERTELLI, L.,^g NATARAJAN, A.T.,^g Measurements of radioactivity due to caesium-137 in blood from individuals internally exposed in the accident in Goiânia: a preliminary report (en cours de préparation).

OLIVEIRA, A.R.,^c VALVERDE, N.J.,^d BRANDAO MELO, C.E., HUNT, J.,^h General medical and related aspects of the accident in Goiânia (à paraître).

VALVERDE, N.J.,^d CORDEIRO, J.M., OLIVEIRA, A.R.,^c BRANDAO MELO, C.E., The acute radiation syndrome in the Brazilian caesium-137 accident.

TAHUATA, L., General description of the radiological accident in Goiânia.

CLARKE BINNS, D.A., searching for radiation: Goiânia, Brazil, 1987.

GUIMARAES, J.R.D., GODOY, J.M., GOUVEA, V.A., ROCHEDO, E.R., Environmental impact of the Goiânia radiological accident.

BRANDAO MELO, C.E., FARINA, R., OLIVEIRA, A.R.,^c The radiation accident in Goiânia: medical aspects. Preliminary reports.

LIPSZTEIN, J.L., OLIVEIRA, C.A.N., BERTELLI, L., AZEREDO, A.M., JULIAO, L., RABELLO, B., VILLALOBOS, J.P., SANTOS, M.S., Internal dosimetry and bioassay procedures for the caesium accident in Goiânia.

RAMALHO, A.T., NASCIMENTO, A.C., BRANDAO MELO, C.E., The accident in Goiânia, Brazil: cytogenetic dose estimates.

BERTELLI, L., LIPSZTEIN, J.L., Age dependent biological half-lives of caesium-137 under the effects of the administration of Prussian Blue to casualties of the accident in Goiânia.

OLIVEIRA, C.A.N., LIPSZTEIN, J.L., LOURENCO, M.C., DANTAS, B.M., LUCENA, E.A., A whole body counter installation for attending to casualties of the accident in Goiânia, Health Physics Society, 1988 Annual Meeting, juillet 1988, Health Phys. **54** Suppl. 1 (1988) S61/S63.

DELGADO, J.U., MENDES, L., Animals contaminated with caesium-137: a question for decision, Ciencia Hoje (mai 1988).

BRANDAO MELO, C.E., FARINA, R., OLIVEIRA, A.R.,^c Short and medium term follow-up programmes for casualties of the accident in Goiânia: a proposal (à paraître).

AMARAL, E.C.S., ROCHEDO, E.R., Setting derived limits for the environment.

AMARAL, E.C.S., GODOY, J.M., CAMPOS, H.J., PIRES DO RIO, M.A., The dispersion of caesium-137 in the soils of Goiânia: differences and implications of their rehabilitation (à paraître).

GODOY, J.M., AMARAL, E.C.S., VIANNA, M.E.C., PIRES DO RIO, M.A., CAMPOS, H.J., OLIVEIRA, J.P., The characteristics of the soils of Goiânia and the migration of caesium-137 (à paraître).

PALACIOS, E.,^j GIMENEZ, J.C.,^j El accidente de Goiânia, Boletin No. 10, Sociedad Argentina de Radioprotección (mars 1988).

ALMEIDA, C.E., ROZENTAL, J.J., NAZARE ALVES, R., The radiological accident in Goiânia: an overview (Int. Congr. of Medical Physics, San Antonio, TX, 6-12 août 1988).

MENDONCA, A.H., The radiological accident in Goiânia, Brazil: preliminary report (4th Int. Symp. Radioecology of Cadarache on the Impact of Accidents of Nuclear Origin on the Environment, mars 1988).

NATIONAL NUCLEAR ENERGY COMMISSION, The Radiological Accident in Goiânia: preliminary report, CNEN, Rio de Janeiro (1988).

NAZARE ALVES, R., The radiological accident in Goiânia: preliminary report, presented to the Board of Governors of the IAEA (février 1988).

ALMEIDA, C.E., The episode in Goiânia: its dimensions and the action taken (Nat'l Acad. of Medicine Mtg., 7 décembre 1987).

*Articles publiés dans un numéro spécial de la publication
Ciencia Hoje, Vol. 7, n° 40 (1988)*

COMMISSION NATIONALE DE L'ENERGIE NUCLEAIRE, Report to the Brazilian Society of Physics: questions and answers (1988).

MOSCATI, G.,^k Radioactive disintegration.

OKUNO, E.,^k Ionizing radiation.

PASCHOA, A.S.,^l A caesium-137 source.

GOMES, R.A.,^m Biological effects.

FERRARI, I.,ⁿ Chromosomal aberration calculations.

LIPSZTEIN, J.L., RAMALHO, A.T., The search for caesium-137.

FERRAZ, E.S.B.,^p The environmental contamination.

GUIMARAES, J.R., Monitoring the contaminated city.

GOMES, R.A.,^m The radiation background.

FRANCA, E.P.,^q Radioactive waste deposit.

FIGUEIREDO, V., DE QUADROS, M.P.S., PEREIRA, E.B., The dilution of responsibilities.

FILHO, J.P.C., The right to information.

PASCHOA, A.S.,^l Radiation protection.

^a FURNAS, Rio de Janeiro

^b DEX III/CNEN, Rio de Janeiro.

^c NUCLEBRAS, Rio de Janeiro.

^d UNICAMP, São Paulo.

^e IPEN/CNEN, São Paulo.

^f IPEN/CNEN, Rio de Janeiro.

^g Département de radiogénétique et de mutagenèse chimique, Université d'Etat de Leiden, Pays-Bas.

- ^h NUCLEI, Rio de Janeiro.
^j Commission nationale de l'énergie atomique, Buenos Aires (Argentine).
^k Institut de physique de l'Université de São Paulo.
^l Département de physique de l'Université catholique de Rio de Janeiro.
^m Institut de biologie de l'Université d'Etat de Rio de Janeiro.
ⁿ Faculté de radioprotection, Université nationale, Brésil.
^p Centre d'application de l'énergie nucléaire à l'agriculture. Université de São Paulo.
^q Institut de biophysique, Université fédérale de Rio de Janeiro.
^r Département de sociologie, Université nationale, Brasília.

Note: Les autres auteurs travaillent à l'Institut de protection radiologique et de dosimétrie (IRD) de la CNEN.

*Procédures d'urgences adoptées lors de l'accident
radiologique de Goiânia*

- Planification de la protection radiologique de la population et de l'environnement au site de stockage provisoire des déchets.
- Procédures relatives à l'emballage et au ramassage des déchets radioactifs produits.
- Identification et classification des zones contaminées.
- Méthodes d'emballage des déchets contaminés par du césium 137.
- Critères de classification des déchets contaminés par du césium 137.
- Critères applicables au stockage des déchets contaminés par du césium 137.
- Définition de normes pour l'eau potable contaminée par du césium 137.
- Etablissement d'un système de limitation et d'évaluation des doses pour le personnel d'intervention professionnellement exposé.
- Critères retenus pour la classification des zones contaminées et leur libération sans restriction.
- Choix des méthodes de classement des zones contaminées.
- Définition de niveaux acceptables de contamination surfacique pour la classification des zones contaminées et leur libération sans restriction.
- Détermination de l'efficacité de comptage et étalonnage du radiamètre bêta/gamma Eberline modèle E520 fourni avec une sonde du type HP270 (Pancake).
- Détermination de l'efficacité de comptage et étalonnage d'un radiamètre bêta/gamma Eberline modèle E120 fourni avec une sonde de type HP270 n^{os} de série 20 et 23.
- Procédures d'évaluation de la radioactivité du sol.
- Procédures d'exploitation normale de la machine à laver SITEC, modèle SLEX-3.
- Critères d'utilisation de la machine à laver le linge de la FURNAS d'une capacité de 30 kg.
- Critères relatifs à la ségrégation des vêtements à laver ou à décontaminer.
- Critères applicables au stockage provisoire dans les hôpitaux et au stockage définitif des excréments des victimes de l'accident radiologique de Goiânia.
- Evaluation de l'inventaire de la source.

Critères applicables à la déconsignation des vêtements appartenant à des membres du public et non contaminés par le césium 137.

Critères applicables pour autoriser les patients contaminés par le césium 137 à sortir de l'hôpital.

Procédures pour la collecte des fûts de déchets radioactifs dans les zones de triage.

Procédures de gestion des déchets pour le site de triage et le transport jusqu'au site de stockage.

Procédures pour le transport des déchets radioactifs collectés.

LISTE DES PARTICIPANTS

REUNION D'EXAMEN SUR L'ACCIDENT DE GOIANIA

Rio de Janeiro
18-22 juillet 1988

Etats Membres

Argentine

Palacios, E.

Allemagne, République fédérale d'

Drexler, G.

Brésil

de Almeida, C.E.
Amaral, E.C.S.
Barretto, P.M.C.
Bertelli Neto, L.
Brandão, C.E.
da Cunha, P.G.
Girarde, H.A.
Godoy, J.M.
Gomes, J.J.
Lipsztein, J.L.
Medeiros, J.A.
Mendonça, A.H.
Oliveira, A.R.
Pélico, J.W.
Penna Franca, E.
Ramalho, A.T.
Rozenal, J.J.
dos Santos, H.I.
da Silva Gomes, J.
Sordi, G.M.
Tahuata, L.
Tranjan Filho, A.
Valverde, N.

Espagne

Saenz-Gancedo, R.

Etats-Unis d'Amérique

Lushbaugh, C.
Paperiello, C.
Ricks, R.

France

Gongora, R.
Nénot, J.-C.

Japon

Katagiri, H.
Matsuo, M.
Oyama, R.

Mexique

Ortíz Magaña, R.

Pays-Bas

Natarajan, A.T.

Royaume-Uni

Croft, J. (consultant de l'AIEA)
Duncan, K.

Union des Républiques socialistes soviétiques

Selidovkin, G.D.

Organisations internationales

<i>Commission des Communautés européennes</i> Oberhofer, M.	<i>Agence internationale de l'énergie atomique</i> González, A.J. Kenneke, A.P. Lederman, L. Utting, R.
<i>Commission internationale de protection radiologique</i> Beninson, D.J. (Président de la réunion)	
<i>Organisation mondiale de la santé</i> Waight, P.J.	

MISSION PREPARATOIRE

La documentation utilisée pour la réunion d'examen a été établie à Rio de Janeiro et à Goiânia entre le 28 avril et le 7 mai 1988. L'équipe préparatoire était notamment composée de:

Croft, J.	Consultant
Kenneke, A.	AIEA
Ricks, R.	Consultant
Utting, R.	AIEA
Wrenn, E.	Consultant

Des personnes dont les noms ne figurent pas dans la liste des participants à la réunion d'examen ont aussi participé au travail:

Institut de radioprotection et de dosimétrie, Rio de Janeiro

Azeredo, A.M.G.F.	Melo, D.R.
Becker, P.	Nascimento, A.C.H.
Dantas, B.M.	Oliveira, C.A.N.
Julião, L.M.Q.C.	Villalobos, J.P.
Lourenço, M.C.	

Institut de recherches nucléaires et énergétiques, São Paulo

Aoki, P.E.	Marumo, J.T.
Bellintani, S.A.	Miyamoto, H.

Costa, C.A.R.
Dellamano, J.C.
Elorza, J.H.
Enokiraha, C.T.
Fukumori, D.T.
Fulfaro, R.
Hiromoto, G.
Lunkes, L.A.
Marques, F.M.F.

Rocca, H.C.C.
Rodrigues, D.L.
Rostelato, M.E.C.M.
Sanchez, M.P.
Suarez, A.A.
Todo, A.S.
Toyoda, E.Y.
Vicente, R.
Vinhas, L.A.

De Goiânia

Borges, W.
Curado, M.P.
Ferreira, W.M.

Girard, H.
Nieto, W.
Oliveira, C.A.N.

COMMENT COMMANDER LES PUBLICATIONS DE L'AIEA

Un dépositaire exclusif des publications de l'AIEA, auquel toutes les commandes et demandes de renseignements doivent être adressées, a été désigné dans le pays suivant:

ETATS-UNIS D'AMERIQUE UNIPUB, 4611-F Assembly Drive, Lanham, MD 20706-4391

Dans les pays ci-après, les publications de l'AIEA sont en vente chez les dépositaires ou libraires indiqués ou par l'intermédiaire des principales librairies locales. Le paiement peut être effectué en monnaie locale ou en coupons de l'UNESCO.

AFRIQUE DU SUD	Van Schaik Bookstore (Pty) Ltd., P.O. Box 724, Pretoria 0001
ARGENTINE	Comisión Nacional de Energía Atómica, Avenida del Libertador 8250, RA-1429 Buenos Aires
AUSTRALIE	Hunter Publications, 58 A Gipps Street, Collingwood, Victoria 3066
BELGIQUE	Service Courrier UNESCO, 202, Avenue du Roi, B-1060 Brussels
CHILI	Comisión Chilena de Energía Nuclear, Venta de Publicaciones Amunategui 95, Casilla 188-D, Santiago
CHINE	Publications de l'AIEA en chinois: China Nuclear Energy Industry Corporation, Translation Service P.O. Box 2103, Beijing Publications de l'AIEA en d'autres langues: China National Publications Import & Export Corporation Deutsche Abteilung, P.O. Box 88, Beijing
ESPAGNE	Díaz de Santos, Lagasca 95, E-28006 Madrid Díaz de Santos, Balmes 417, E-08022 Barcelona
FRANCE	Office International de Documentation et Librairie, 48, rue Gay-Lussac, F-75240 Paris Cedex 05
HONGRIE	Kultura, Hungarian Foreign Trading Company, P.O. Box 149, H-1389 Budapest 62
INDE	Oxford Book and Stationery Co., 17, Park Street, Calcutta-700 016 Oxford Book and Stationery Co., Scindia House, New Delhi-110 001
ISRAEL	Heitiger & Co. Ltd. 23 Keren Hayesod Street, Jerusalem 94188
ITALIE	Libreria Scientifica, Dott. Lucio de Biasio "aeiou", Via Meravigli 16, I-20123 Milan
JAPON	Maruzen Company, Ltd., P.O. Box 5050, 100-31 Tokyo International
PAKISTAN	Mirza Book Agency, 65, Shahrah Quaid-e-Azam, P.O. Box 729, Lahore-3
POLOGNE	Ars Polona-Ruch, Centrala Handlu Zagranicznego, Krakowskie Przedmiescie 7, PL-00-068 Varsovie
ROUMANIE	Ilexim, P.O. Box 136-137, Bucarest
ROYAUME-UNI	Her Majesty's Stationery Office, Publications Centre, Agency Section 51 Nine Elms Lane, London SW8 5DR
SUEDE	AB Fritzes Kungl. Hovbokhandel, Fredsgatan 2, P.O. Box 16356, S-103 27 Stockholm
TCHECOSLOVAQUIE	S.N.T.L., Mikulandska 4, CS-116 86 Praha 1 Alfa, Publishers, Hurbanovo námestie 3, CS-815 89 Bratislava
URSS	Mezhdunarodnaya Kniga, Smolenskaya-Sennaya 32-34, Moscou G-200
YUGOSLAVIE	Jugoslovenska Knjiga, Terazije 27, POB 36, YU-11001 Belgrade

Les commandes émanant de pays dans lesquels l'Agence n'a pas de dépositaires officiels, ainsi que les demandes de renseignements, doivent être adressées directement à l'adresse suivante:



Division des publications
Agence internationale de l'énergie atomique
Wagramerstrasse 5, B.P. 100, A-1400 Vienne, Autriche

FIG. 7. Plan de Goiânia indiquant les principaux sites de la contamination.

FIG. 8. Schéma de la dispersion du césium 137 lors de l'accident de Goiânia.

FIG. 9. Liste des personnes les plus gravement contaminées lors de l'accident de Goiânia.



- | | |
|---------------------------|---|
| A: Lieu d'IGR | G: Maison du physicien W.F. |
| B: Ouverture de la source | H: Stade olympique |
| C: Dépôt de ferraille I | J: Hôpital général |
| D: Dépôt de ferraille II | K,L: Autres points contaminés |
| E: Dépôt de ferraille III | M: Poste de commande initial de la CNEN |
| F: Vigilância Sanitária | N: Bureau actuel de la CNEN |

FIG. 7. Plan de Goiânia indiquant les principaux sites de la contamination.

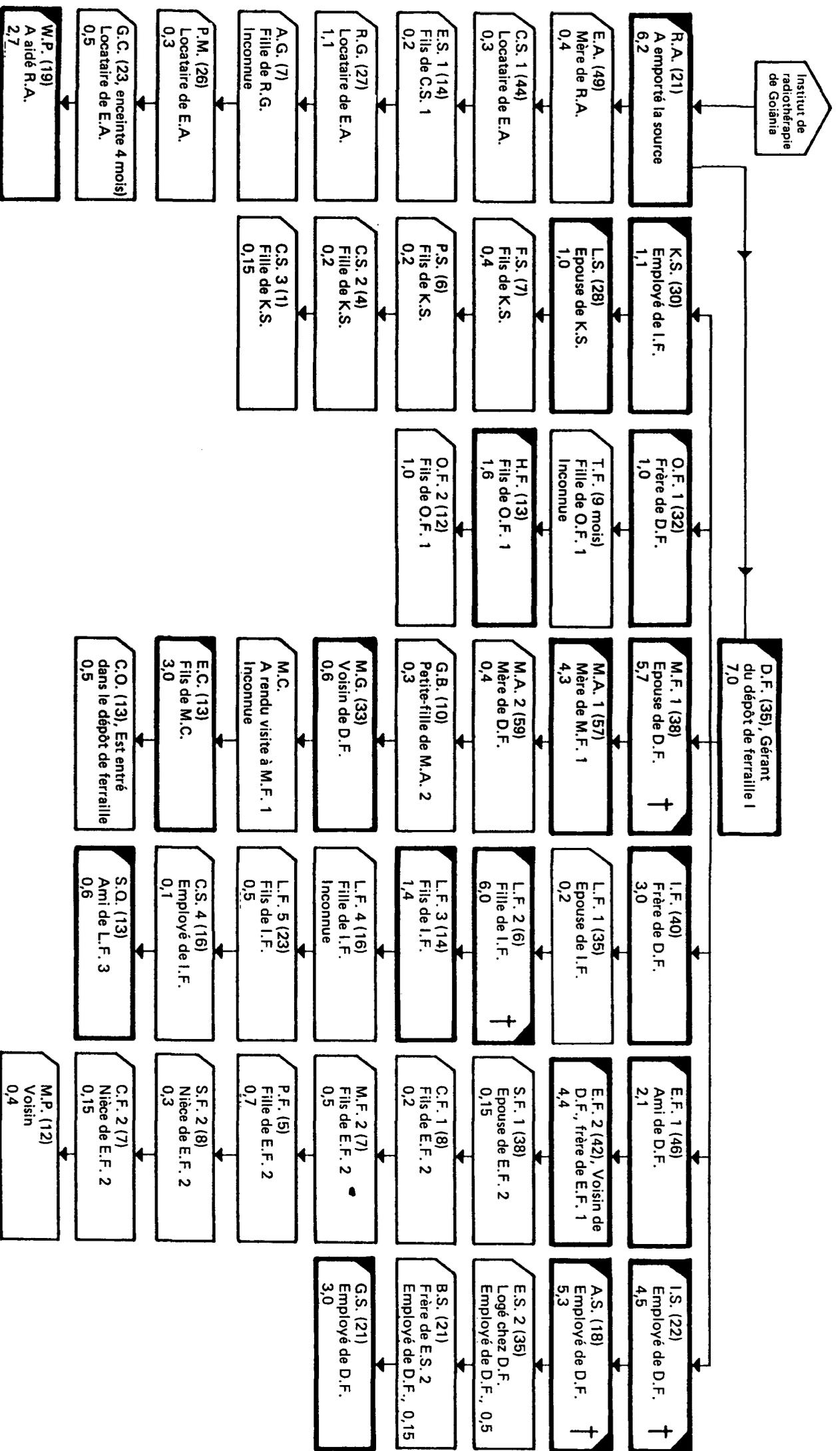


FIG. 9 Liste des personnes les plus gravement contaminées lors de l'accident de Goiânia, classées en fonction du lieu de l'exposition et des liens familiaux. Les estimations des doses reçues (en gray) établies à partir d'analyses cytogénétiques et des renseignements sur les patients hospitalisés et les quatre personnes décédées sont également indiqués. (Le cadre en traits forts dénote un patient hospitalisé; les autres patients ont été traités en consultation externe.)

AGENCE INTERNATIONALE
DE L'ENERGIE ATOMIQUE
VIENNE, 1989