



HAL
open science

Pathologie professionnelle liée aux rayonnements ionisants: à propos de 7 observations

Virginie Huber Gresser

► **To cite this version:**

Virginie Huber Gresser. Pathologie professionnelle liée aux rayonnements ionisants: à propos de 7 observations. Sciences du Vivant [q-bio]. 2004. hal-01734349

HAL Id: hal-01734349

<https://hal.univ-lorraine.fr/hal-01734349>

Submitted on 14 Mar 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

Double

174748

UNIVERSITE HENRI POINCARÉ NANCY 1
2004

FACULTE DE MEDECINE DE NANCY
N° 73



THESE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR EN MEDECINE

Présentée et soutenue publiquement
dans le cadre du troisième cycle de Médecine Spécialisée

par

Virginie **HUBER GRESSER**

Le 22 juin 2004

**PATHOLOGIE PROFESSIONNELLE LIEE
AUX RAYONNEMENTS IONISANTS :
A propos de 7 observations**

Examineurs de la thèse :

M. Guy PETIET
M. Pierre LEDERLIN
M. Michel CLAUDON
M. Amar NAOUN (Directeur)

Professeur
Professeur
Professeur
Maître de Conférence

Président
Juge
Juge
Juge

BIBLIOTHEQUE MEDECINE NANCY 1



D

007 229519 0

19 JUL. 2004



THESE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR EN MEDECINE

Présentée et soutenue publiquement
dans le cadre du troisième cycle de Médecine Spécialisée

par

Virginie **HUBER GRESSER**

Le 22 juin 2004

**PATHOLOGIE PROFESSIONNELLE LIEE
AUX RAYONNEMENTS IONISANTS :
A propos de 7 observations**

Examineurs de la thèse :

M. Guy PETIET

M. Pierre LEDERLIN

M. Michel CLAUDON

M. Amar NAOUN (Directeur)

Professeur

Professeur

Professeur

Maître de Conférence

Président

Juge

Juge

Juge

UNIVERSITÉ HENRI POINCARÉ, NANCY I

FACULTÉ DE MÉDECINE DE NANCY

Président de l'Université : Professeur Jean-Pierre FINANCE

Doyen de la Faculté de Médecine : Professeur Patrick NETTER

Vice-Doyen de la Faculté de Médecine : Professeur Henry COUDANE

Asseseurs

du 1^{er} Cycle :

du 2^{ème} Cycle :

du 3^{ème} Cycle :

de la Vie Facultaire :

Mme le Docteur Chantal KOHLER

Mr le Professeur Jean-Pierre BRONOWICKI

Mr le Professeur Hervé VESPIGNANI

Mr le Professeur Bruno LEHEUP

DOYENS HONORAIRES

Professeur Adrien DUPREZ – Professeur Jean-Bernard DUREUX

Professeur Georges GRIGNON – Professeur Jacques ROLAND

PROFESSEURS HONORAIRES

Louis PIERQUIN – Etienne LEGAIT – Jean LOCHARD – René HERBEUVAL – Gabriel FAIVRE – Jean-Marie FOLIGUET

Guy RAUBER – Paul SADOUL – Raoul SENAULT – Marcel RIBON

Jacques LACOSTE – Jean BEUREY – Jean SOMMELET – Pierre HARTEMANN – Emile de LAVERGNE

Augusta TREHEUX – Michel MANCIAUX – Paul GUILLEMIN – Pierre PAYSANT

Jean-Claude BURDIN – Claude CHARDOT – Jean-Bernard DUREUX – Jean DUHEILLE – Jean-Pierre GRILLIAT

Pierre LAMY – Jean-Marie GILGENKRANTZ – Simone GILGENKRANTZ

Pierre ALEXANDRE – Robert FRISCH – Michel PIERSON – Jacques ROBERT

Gérard DEBRY – Georges GRIGNON – Pierre TRIDON – Michel WAYOFF – François CHERRIER – Oliéro GUERCI

Gilbert PERCEBOIS – Claude PERRIN – Jean PREVOT – Jean FLOQUET

Alain GAUCHER – Michel LAXENAIRE – Michel BOULANGE – Michel DUC – Claude HURIET – Pierre LANDES

Alain LARCAN – Gérard VAILLANT – Daniel ANTHOINE – Pierre GAUCHER – René-Jean ROYER

Hubert UFFHOLTZ – Jacques LECLERE – Francine NABET – Jacques BORRELLY

Michel RENARD – Jean-Pierre DESCHAMPS – Pierre NABET – Marie-Claire LAXENAIRE – Adrien DUPREZ – Paul VERT

Philippe CANTON – Bernard LEGRAS – Pierre MATHIEU – Jean-Marie POLU

Antoine RASPILLER – Gilbert THIBAUT – Michel WEBER – Gérard FIEVE

=====

PROFESSEURS DES UNIVERSITÉS -
PRATICIENS HOSPITALIERS

(Disciplines du Conseil National des Universités)

42^{ème} Section : MORPHOLOGIE ET MORPHOGENÈSE

1^{ère} sous-section : (*Anatomie*)

Professeur Jacques ROLAND – Professeur Gilles GROSDIDIER

Professeur Pierre LASCOMBES – Professeur Marc BRAUN

2^{ème} sous-section : (*Cytologie et histologie*)

Professeur Bernard FOLIGUET

3^{ème} sous-section : (*Anatomie et cytologie pathologiques*)

Professeur François PLENAT - Professeur Jean-Michel VIGNAUD – Professeur Eric LABOUYRIE

43^{ème} Section : BIOPHYSIQUE ET IMAGERIE MÉDICALE

1^{ère} sous-section : (*Biophysique et médecine nucléaire*)

Professeur Alain BERTRAND – Professeur Gilles KARCHER – Professeur Pierre-Yves MARIE

2^{ème} sous-section : (*Radiologie et imagerie médicale*)

Professeur Luc PICARD – Professeur Denis REGENT - Professeur Michel CLAUDON

Professeur Serge BRACARD – Professeur Alain BLUM - Professeur Jacques FELBLINGER

44^{ème} Section : BIOCHIMIE, BIOLOGIE CELLULAIRE ET MOLÉCULAIRE, PHYSIOLOGIE ET NUTRITION

1^{ère} sous-section : (*Biochimie et biologie moléculaire*)

Professeur Jean-Pierre NICOLAS

Professeur Jean-Louis GUÉANT – Professeur Jean-Luc OLIVIER

2^{ème} sous-section : (*Physiologie*)

Professeur Jean-Pierre CRANCE – Professeur Jean-Pierre MALLIE

Professeur François MARCHAL – Professeur Philippe HAOUZI

3^{ème} sous-section : (*Biologie cellulaire*)

Professeur Claude BURLET

4^{ème} sous-section : (*Nutrition*)

Professeur Olivier ZIEGLER

45^{ème} Section : MICROBIOLOGIE, MALADIES TRANSMISSIBLES ET HYGIÈNE

1^{ère} sous-section : (*Bactériologie – virologie ; hygiène hospitalière*)

Professeur Alain LE FAOU – Professeur Alain LOZNIEWSKI

2^{ème} sous-section : (*Parasitologie et mycologie*)

Professeur Bernard FORTIER

3^{ème} sous-section : (*Maladies infectieuses ; maladies tropicales*)

Professeur Thierry MAY – Professeur Christian RABAUD

46^{ème} Section : SANTÉ PUBLIQUE, ENVIRONNEMENT ET SOCIÉTÉ

1^{ère} sous-section : (*Épidémiologie, économie de la santé et prévention*)

Professeur Philippe HARTEMANN – Professeur Serge BRIANÇON

Professeur Francis GUILLEMIN – Professeur Denis ZMIROU

2^{ème} sous-section : (*Médecine et santé au travail*)

Professeur Guy PETIET – Professeur Christophe PARIS

3^{ème} sous-section : (*Médecine légale et droit de la santé*)

Professeur Henry COUDANE

4^{ème} sous-section : (*Biostatistiques, informatique médicale et technologies de communication*)

Professeur François KOHLER – Professeur Éliane ALBUISSON

47^{ème} Section : CANCÉROLOGIE, GÉNÉTIQUE, HÉMATOLOGIE, IMMUNOLOGIE

1^{ère} sous-section : (*Hématologie ; transfusion*)

Professeur Christian JANOT – Professeur Thomas LECOMPTE – Professeur Pierre BORDIGONI

Professeur Pierre LEDERLIN – Professeur Jean-François STOLTZ

2^{ème} sous-section : (*Cancérologie ; radiothérapie*)

Professeur François GUILLEMIN – Professeur Thierry CONROY

Professeur Pierre BEY – Professeur Didier PEIFFERT

3^{ème} sous-section : (*Immunologie*)

Professeur Gilbert FAURE – Professeur Marie-Christine BENE

4^{ème} sous-section : (*Génétique*)

Professeur Philippe JONVEAUX – Professeur Bruno LEHEUP

48^{ème} Section : ANESTHÉSIOLOGIE, RÉANIMATION, MÉDECINE D'URGENCE,
PHARMACOLOGIE ET THÉRAPEUTIQUE

1^{ère} sous-section : (*Anesthésiologie et réanimation chirurgicale*)

Professeur Claude MEISTELMAN – Professeur Dan LONGROIS - Professeur Hervé BOUAZIZ

Professeur Paul-Michel MERTES

2^{ème} sous-section : (*Réanimation médicale*)

Professeur Henri LAMBERT – Professeur Alain GERARD

Professeur Pierre-Edouard BOLLAERT – Professeur Bruno LÉVY

3^{ème} sous-section : (*Pharmacologie fondamentale ; pharmacologie clinique*)

Professeur Patrick NETTER – Professeur Pierre GILLET

4^{ème} sous-section : (*Thérapeutique*)

Professeur François PAILLE – Professeur Gérard GAY – Professeur Faiez ZANNAD

49^{ème} Section : PATHOLOGIE NERVEUSE ET MUSCULAIRE, PATHOLOGIE MENTALE, HANDICAP et RÉÉDUCATION

1^{ère} sous-section : (Neurologie)

Professeur Gérard BARROCHE – Professeur Hervé VESPIGNANI
Professeur Xavier DUCROCQ

2^{ème} sous-section : (Neurochirurgie)

Professeur Jean-Claude MARCHAL – Professeur Jean AUQUE
Professeur Thierry CIVIT

3^{ème} sous-section : (Psychiatrie d'adultes)

Professeur Jean-Pierre KAHN

4^{ème} sous-section : (Pédopsychiatrie)

Professeur Colette VIDAILHET – Professeur Daniel SIBERTIN-BLANC

5^{ème} sous-section : (Médecine physique et de réadaptation)

Professeur Jean-Marie ANDRE

50^{ème} Section : PATHOLOGIE OSTÉO-ARTICULAIRE, DERMATOLOGIE et CHIRURGIE PLASTIQUE

1^{ère} sous-section : (Rhumatologie)

Professeur Jacques POUREL – Professeur Isabelle VALCKENAERE

2^{ème} sous-section : (Chirurgie orthopédique et traumatologique)

Professeur Daniel SCHMITT – Professeur Jean-Pierre DELAGOUTTE – Professeur Daniel MOLE
Professeur Didier MAINARD

3^{ème} sous-section : (Dermato-vénéréologie)

Professeur Jean-Luc SCHMUTZ – Professeur Annick BARBAUD

4^{ème} sous-section : (Chirurgie plastique, reconstructrice et esthétique)

Professeur François DAP

51^{ème} Section : PATHOLOGIE CARDIORESPIRATOIRE et VASCULAIRE

1^{ère} sous-section : (Pneumologie)

Professeur Yves MARTINET - Professeur Jean-François CHABOT

2^{ème} sous-section : (Cardiologie)

Professeur Etienne ALIOT – Professeur Yves JUILLIERE – Professeur Nicolas SADOUL –
Professeur Christian de CHILLOU

3^{ème} sous-section : (Chirurgie thoracique et cardiovasculaire)

Professeur Jean-Pierre VILLEMOT

Professeur Jean-Pierre CARTEAUX – Professeur Loïc MACE

4^{ème} sous-section : (Chirurgie vasculaire ; médecine vasculaire)

52^{ème} Section : MALADIES DES APPAREILS DIGESTIF et URINAIRE

1^{ère} sous-section : (Gastroentérologie ; hépatologie)

Professeur Marc-André BIGARD

Professeur Jean-Pierre BRONOWICKI

2^{ème} sous-section : (Chirurgie digestive)

3^{ème} sous-section : (Néphrologie)

Professeur Michèle KESSLER – Professeur Dominique HESTIN (Mme)

4^{ème} sous-section : (Urologie)

Professeur Philippe MANGIN – Professeur Jacques HUBERT – Professeur Luc CORMIER

53^{ème} Section : MÉDECINE INTERNE, GÉRIATRIE et CHIRURGIE GÉNÉRALE

1^{ère} sous-section : (Médecine interne)

Professeur Francis PENIN – Professeur Denise MONERET-VAUTRIN – Professeur Denis WAHL
Professeur Jean-Dominique DE KORWIN – Professeur Pierre KAMINSKY

Professeur Athanase BENETOS - Professeur Gisèle KANNY

2^{ème} sous-section : (Chirurgie générale)

Professeur Patrick BOISSEL – Professeur Laurent BRESLER

54^{ème} Section : DÉVELOPPEMENT ET PATHOLOGIE DE L'ENFANT, GYNÉCOLOGIE-OBSTÉTRIQUE,
ENDOCRINOLOGIE ET REPRODUCTION

1^{ère} sous-section : (*Pédiatrie*)

Professeur Danièle SOMMELET – Professeur Michel VIDAILHET – Professeur Pierre MONIN
Professeur Jean-Michel HASCOET – Professeur Pascal CHASTAGNER – Professeur François FEILLET

2^{ème} sous-section : (*Chirurgie infantile*)

Professeur Michel SCHMITT – Professeur Gilles DAUTEL – Professeur Pierre JOURNEAU

3^{ème} sous-section : (*Gynécologie-obstétrique ; gynécologie médicale*)

Professeur Michel SCHWEITZER – Professeur Jean-Louis BOUTROY

Professeur Philippe JUDLIN – Professeur Patricia BARBARINO

4^{ème} sous-section : (*Endocrinologie et maladies métaboliques*)

Professeur Georges WERYHA – Professeur Marc KLEIN – Professeur Bruno GUERCI

5^{ème} sous-section : (*Biologie et médecine du développement et de la reproduction*)

Professeur Hubert GERARD

55^{ème} Section : PATHOLOGIE DE LA TÊTE ET DU COU

1^{ère} sous-section : (*Oto-rhino-laryngologie*)

Professeur Claude SIMON – Professeur Roger JANKOWSKI

2^{ème} sous-section : (*Ophtalmologie*)

Professeur Jean-Luc GEORGE – Professeur Jean-Paul BERROD – Professeur Karine ANGIOI-DUPREZ

3^{ème} sous-section : (*Chirurgie maxillo-faciale et stomatologie*)

Professeur Michel STRICKER – Professeur Jean-François CHASSAGNE

=====

PROFESSEURS DES UNIVERSITÉS

64^{ème} Section : BIOCHIMIE ET BIOLOGIE MOLÉCULAIRE

Professeur Daniel BURNEL

=====

MAÎTRES DE CONFÉRENCES DES UNIVERSITÉS - PRATICIENS HOSPITALIERS

42^{ème} Section : MORPHOLOGIE ET MORPHOGENÈSE

1^{ère} sous-section : (*Anatomie*)

Docteur Bruno GRIGNON – Docteur Jean-Pascal FYAD

2^{ème} sous-section : (*Cytologie et histologie*)

Docteur Edouard BARRAT – Docteur Jean-Claude GUEDENET

Docteur Françoise TOUATI – Docteur Chantal KOHLER

3^{ème} sous-section : (*Anatomie et cytologie pathologiques*)

Docteur Yves GRIGNON – Docteur Béatrice MARIE

Docteur Laurent ANTUNES

43^{ème} Section : BIOPHYSIQUE ET IMAGERIE MÉDICALE

1^{ère} sous-section : (*Biophysique et médecine nucléaire*)

Docteur Marie-Hélène LAURENS – Docteur Jean-Claude MAYER

Docteur Pierre THOUVENOT – Docteur Jean-Marie ESCANYE – Docteur Amar NAOUN

44^{ème} Section : BIOCHIMIE, BIOLOGIE CELLULAIRE ET MOLÉCULAIRE, PHYSIOLOGIE ET NUTRITION

1^{ère} sous-section : (*Biochimie et biologie moléculaire*)

Docteur Xavier HERBEUVAL – Docteur Jean STRACZEK – Docteur Sophie FREMONT

Docteur Isabelle GASTIN – Docteur Bernard NAMOUR – Docteur Marc MERTEN

2^{ème} sous-section : (*Physiologie*)

Docteur Gérard ETHEVENOT – Docteur Nicole LEMAU de TALANCE – Docteur Christian BEYAERT

4^{ème} sous-section : (*Nutrition*)

Docteur Didier QUILLIOT

45^{ème} Section : MICROBIOLOGIE, MALADIES TRANSMISSIBLES ET HYGIÈNE

1^{ère} sous-section : (*Bactériologie – Virologie ; hygiène hospitalière*)

Docteur Francine MORY – Docteur Michèle WEBER – Docteur Christine LION

Docteur Michèle DAILLOUX – Docteur Véronique VENARD

2^{ème} sous-section : (*Parasitologie et mycologie*)

Docteur Marie-France BIAVA – Docteur Nelly CONTET-AUDONNEAU

46^{ème} Section : SANTÉ PUBLIQUE, ENVIRONNEMENT ET SOCIÉTÉ

1^{ère} sous-section : (*Epidémiologie, économie de la santé et prévention*)

Docteur François ALLA

4^{ème} sous-section : (*Biostatistiques, informatique médicale et technologies de communication (type biologique)*)

Docteur Pierre GILLOIS

47^{ème} Section : CANCÉROLOGIE, GÉNÉTIQUE, HÉMATOLOGIE, IMMUNOLOGIE

1^{ère} sous-section : (*Hématologie ; transfusion*)

Docteur François SCHOONEMAN

3^{ème} sous-section : (*Immunologie*)

Docteur Marie-Nathalie SARDA

4^{ème} sous-section : (*Génétique*)

Docteur Christophe PHILIPPE

48^{ème} Section : ANESTHÉSIOLOGIE, RÉANIMATION, MÉDECINE D'URGENCE,
PHARMACOLOGIE ET THÉRAPEUTIQUE

1^{ère} sous-section : (*Anesthésiologie et réanimation chirurgicale*)

Docteur Jacqueline HELMER – Docteur Gérard AUDIBERT

3^{ème} sous-section : (*Pharmacologie fondamentale ; pharmacologie clinique*)

Docteur Françoise LAPICQUE – Docteur Marie-José ROYER-MORROT

Docteur Damien LOEUILLÉ

54^{ème} Section : DÉVELOPPEMENT ET PATHOLOGIE DE L'ENFANT, GYNÉCOLOGIE-OBSTÉTRIQUE,
ENDOCRINOLOGIE ET REPRODUCTION

5^{ème} sous-section : (*Biologie et médecine du développement et de la reproduction*)

Docteur Jean-Louis CORDONNIER

=====

MAÎTRES DE CONFÉRENCES

19^{ème} section : SOCIOLOGIE, DÉMOGRAPHIE

Madame Michèle BAUMANN

32^{ème} section : CHIMIE ORGANIQUE, MINÉRALE, INDUSTRIELLE

Monsieur Jean-Claude RAFT

40^{ème} section : SCIENCES DU MÉDICAMENT
Monsieur Jean-Yves JOUZEAU

60^{ème} section : MÉCANIQUE, GÉNIE MÉCANIQUE ET GÉNIE CIVILE
Monsieur Alain DURAND

64^{ème} section : BIOCHIMIE ET BIOLOGIE MOLÉCULAIRE
Madame Marie-Odile PERRIN – Mademoiselle Marie-Claire LANHERS

65^{ème} section : BIOLOGIE CELLULAIRE
Mademoiselle Françoise DREYFUSS – Monsieur Jean-Louis GELLY – Madame Anne GERARD
Madame Ketsia HESS – Monsieur Pierre TANKOSIC – Monsieur Hervé MEMBRE

67^{ème} section : BIOLOGIE DES POPULATIONS ET ÉCOLOGIE
Madame Nadine MUSSE

68^{ème} section : BIOLOGIE DES ORGANISMES
Madame Tao XU-JIANG

=====

MAÎTRES DE CONFÉRENCES ASSOCIÉS

Médecine Générale

Docteur Alain AUBREGE
Docteur Francis RAPHAEL

=====

PROFESSEURS ÉMÉRITES

Professeur Georges GRIGNON – Professeur Michel PIERSON - Professeur Michel BOULANGE
Professeur Alain LARCAN - Professeur Michel WAYOFF – Professeur Daniel ANTHOINE
Professeur Hubert UFFHOLTZ – Professeur Pierre GAUCHER – Professeur Claude CHARDOT
Professeur Adrien DUPREZ - Professeur Paul VERT – Professeur Jean PREVOT – Professeur Jean-Pierre GRILLIAT
Professeur Philippe CANTON – Professeur Pierre MATHIEU – Professeur Gilbert THIBAUT

=====

DOCTEURS HONORIS CAUSA

Professeur Norman SHUMWAY (1972)
Université de Stanford, Californie (U.S.A)
Professeur Paul MICHIELSEN (1979)
Université Catholique, Louvain (Belgique)
Professeur Charles A. BERRY (1982)
Centre de Médecine Préventive, Houston (U.S.A)
Professeur Pierre-Marie GALETTI (1982)
Brown University, Providence (U.S.A)
Professeur Mamish Nisbet MUNRO (1982)
Massachusetts Institute of Technology (U.S.A)
Professeur Mildred T. STAHLMAN (1982)
Wanderbilt University, Nashville (U.S.A)
Harry J. BUNCKE (1989)
Université de Californie, San Francisco (U.S.A)

Professeur Théodore H. SCHIEBLER (1989)
Institut d'Anatomie de Würzburg (R.F.A)
Professeur Maria DELIVORIA-PAPADOPOULOS (1996)
Université de Pennsylvanie (U.S.A)
Professeur Mashaki KASHIWARA (1996)
Research Institute for Mathematical Sciences de Kyoto (JAPON)
Professeur Ralph GRÄSBECK (1996)
Université d'Helsinki (FINLANDE)
Professeur James STEICHEN (1997)
Université d'Indianapolis (U.S.A)
Professeur Duong Quang TRUNG (1997)
*Centre Universitaire de Formation et de Perfectionnement des
Professionnels de Santé d'Hô Chi Minh-Ville (VIËTNAM)*

A notre Maître et Président de thèse

Monsieur le Professeur Guy PETIET,
Professeur de Médecine du Travail et des Risques Professionnels

Vous nous faites l'honneur d'accepter de présider notre jury de thèse.

Nous avons appris auprès de vous les bases nécessaires à la pratique de la Médecine du Travail. Nous avons pu apprécier votre rigueur et votre professionnalisme.

Veillez trouver ici l'expression de notre gratitude et de notre profond respect.

A notre Maître et juge,

Monsieur le Professeur Pierre LEDERLIN
Professeur de Médecine Interne

Nous sommes très sensibles à l'honneur que vous nous faites en acceptant de juger cette thèse.

Nous vous exprimons notre respect et toute notre gratitude.

A notre Maître et juge,

Monsieur le Professeur Michel CLAUDON
Professeur de Radiologie

Nous sommes très honorée de votre présence dans notre jury.

Nous vous exprimons notre profond respect et nos sincères
remerciements.

A notre Maître et Juge,

Monsieur le Docteur Amar NAOUN

Docteur de Biophysique et de Médecine Nucléaire, Maître de Conférences des Universités

Vous nous faites l'honneur d'accepter de juger cette thèse.

Vous avez dirigé notre travail et nous vous remercions de votre disponibilité, de vos précieux conseils et de vos corrections.

Nous souhaitons vous exprimer toute notre gratitude pour la richesse de votre enseignement tout au long de ce travail.

Nous vous exprimons notre profond respect et nos sincères remerciements.

A mes parents,

Merci pour le soutien que vous m'avez apporté tout au long de mes études.

A Dominique,

Merci de ta patience, de ta présence rassurante et de ton soutien.

A Mathieu,

Merci pour le bonheur que tu m'apportes.

A mon frère Mickaël et à ma sœur Christelle,

A toute ma famille.

A mes amies Séverine et Christelle

Merci pour votre amitié que vous m'avez souvent témoignée.

A mes amis.

SERMENT

"Au moment d'être admise à exercer la médecine, je promets et je jure d'être fidèle aux lois de l'honneur et de la probité. Mon premier souci sera de rétablir, de préserver ou de promouvoir la santé dans tous ses éléments, physiques et mentaux, individuels et sociaux. Je respecterai toutes les personnes, leur autonomie et leur volonté, sans aucune discrimination selon leur état ou leurs convictions. J'interviendrai pour les protéger si elles sont affaiblies, vulnérables ou menacées dans leur intégrité ou leur dignité. Même sous la contrainte, je ne ferai pas usage de mes connaissances contre les lois de l'humanité. J'informerai les patients des décisions envisagées, de leurs raisons et de leurs conséquences. Je ne tromperai jamais leur confiance et n'exploiterai pas le pouvoir hérité des circonstances pour forcer les consciences. Je donnerai mes soins à l'indigent et à quiconque me les demandera. Je ne me laisserai pas influencer par la soif du gain ou la recherche de la gloire.

Admise dans l'intimité des personnes, je tairai les secrets qui me sont confiés. Reçue à l'intérieur des maisons, je respecterai les secrets des foyers et ma conduite ne servira pas à corrompre les mœurs. Je ferai tout pour soulager les souffrances. Je ne prolongerai pas abusivement les agonies. Je ne provoquerai jamais la mort délibérément.

Je préserverai l'indépendance nécessaire à l'accomplissement de ma mission. Je n'entreprendrai rien qui dépasse mes compétences. Je les entretiendrai et les perfectionnerai pour assurer au mieux les services qui me seront demandés.

J'apporterai mon aide à mes confrères ainsi qu'à leurs familles dans l'adversité.

Que les hommes et mes confrères m'accordent leur estime si je suis fidèle à mes promesses ; que je sois déshonorée et méprisée si j'y manque".

Table des matières

Table des matières

TABLE DES MATIERES.....	15
INTRODUCTION	21
1. QUELQUES PAGES D'HISTOIRE	23
1.1. L'Uranium	23
1.2. De nouveaux corps radioactifs : le Polonium et le Radium	23
1.3. Mise en évidence de « l'action physiologique » des rayonnements des corps radioactifs.....	24
1.4. La radioactivité est la transmutation spontanée d'un élément chimique en un autre.....	24
1.5. De la découverte du noyau à la radioactivité artificielle	25
2. LES DIFFERENTS TYPES D'IRRADIATION	27
2.1. Bases physiques – notions élémentaires.....	27
2.1.1. L'atome et ses constituants.....	27
2.1.2. Instabilité des noyaux atomiques.....	28
2.1.3. Stabilisation de radioéléments par désintégration α , β^- , β^+	28
2.1.4. Ondes électromagnétiques.....	29
2.1.5. La nature des rayonnements ionisants	31
2.1.5.1. Les rayonnements chargés électriquement	31
2.1.5.2. Les rayonnements non chargés électriquement	33
2.1.6. Activité et période d'un radioélément	35
2.1.7. Action des rayonnements sur la matière.....	36
2.1.8. Les modes d'exposition aux rayonnements.....	38
2.1.8.1. Position de la source par rapport à la personne exposée.....	38
2.1.8.2. Effets de l'irradiation.....	38
2.1.8.3. Effets de la contamination interne	39
2.2. Irradiation naturelle par les rayonnements ionisants	39
2.2.1. Le rayonnement cosmique.....	39
2.2.1.1. Irradiation externe	39
2.2.1.2. Irradiation interne	39
2.2.2. Le rayonnement tellurique.....	40
2.2.2.1. Irradiation externe	40
2.2.2.2. Irradiation interne	40
2.3. Irradiation artificielle due à l'activité humaine : principales origines	41
2.3.1. Exposition du public.....	42
2.3.1.1. Irradiation médicale.....	42
2.3.1.2. Irradiation non médicale.....	43
2.3.2. Exposition professionnelle	43
2.3.3. Au total.....	43
3. EFFETS BIOLOGIQUES DES RAYONNEMENTS IONISANTS	47
3.1. Effets moléculaires	47

3.2. Effets cellulaires.....	49
3.2.1. Mort cellulaire	50
3.2.2. Mutations.....	52
3.2.3. Facteurs de la radiosensibilité cellulaire.....	53
3.3. Effets tissulaires.....	54
3.3.1. Les tissus compartimentaux	54
3.3.2. Les tissus non compartimentaux	55
4. EFFETS SUR L'HOMME	57
4.1. Effets déterministes	57
4.1.1. Exposition externe globale	57
4.1.2. Exposition externe partielle.....	58
4.1.2.1. Atteinte de la peau.....	58
4.1.2.2. Effets sur les gonades.....	60
4.1.2.3. Effets sur l'œil.....	61
4.1.2.4. Effets sur la thyroïde	61
4.1.2.5. Effets sur le système hématopoïétique	61
4.1.2.6. Autres effets viscéraux	62
4.2. Effets stochastiques ou aléatoires.....	63
4.2.1. Effets cancérogènes des radiations.....	64
4.2.1.1. Etudes expérimentales	64
4.2.1.2. Etudes épidémiologiques.....	65
4.2.1.3. Evaluation des risques aux faibles doses.....	67
4.2.1.4. Extrapolation des données observées à la vie entière	69
4.2.1.5. Les différents types de cancers observés.....	69
4.2.2. Effets génétiques	70
4.3. Effets tératogènes	72
5. EXPOSITIONS PROFESSIONNELLES.....	75
5.1. Utilisations industrielles des rayonnements ionisants	75
5.1.1. Techniques de radiographie industrielle.....	75
5.1.1.1. Gammagraphie	75
5.1.1.2. Radiographie X industrielle.....	77
5.1.1.3. Bêtagraphie (radiographie par électrons)	78
5.1.1.4. Neutrographie (radiographie par neutrons)	78
5.1.2. Jauges radiométriques	78
5.1.2.1. Principe	78
5.1.2.2. Jauges de niveau.....	79
5.1.2.3. Jauges d'épaisseur	79
5.1.2.4. Jauges de densité	80
5.1.2.5. Jauges d'humidité.....	80
5.1.3. Traceurs radioactifs industriels.....	80
5.1.3.1. Principe	80
5.1.3.2. Utilisations	80
5.1.4. Applications reposant sur le principe de l'ionisation des gaz.....	81
5.1.4.1. Elimination de l'électricité statique.....	81
5.1.4.2. Détecteurs de fumées.....	81
5.1.4.3. Paratonnerres radioactifs	81
5.1.4.4. Autres applications dérivées.....	81
5.1.5. Biologie végétale et radioagronomie.....	82
5.1.5.1. Recherches sur la photosynthèse	82
5.1.5.2. Radiomutagenèse.....	82
5.1.5.3. Radioconservation des denrées.....	82
5.1.6. Sciences de la terre	83

5.1.6.1. Diagraphie et prospection minière.....	83
5.1.6.2. Hydrologie.....	83
5.1.7. Applications basées sur le principe de la polymérisation et de la réticulation radio-induites	84
5.1.8. Coloration des matériaux isolants	84
5.1.9. Utilisation industrielle du Thorium	85
5.1.10. Conclusion.....	85
5.2. Exposition professionnelle médicale aux rayonnements ionisants	85
5.2.1. Services de radiodiagnostic	86
5.2.1.1. Services de radiodiagnostic classique.....	86
5.2.1.2. Radioscopie et amplificateur de brillance	87
5.2.1.3. Radiologie interventionnelle	88
5.2.2. Services de radiothérapie.....	88
5.2.3. Services de curiethérapie.....	90
5.2.3.1. Salles d'implantation.....	90
5.2.3.2. Chambres d'hospitalisation	91
5.2.3.3. Nouvelles technologies.....	91
5.2.4. Services de médecine nucléaire.....	91
5.2.4.1. Principaux radioéléments utilisés	92
5.2.4.2. Hospitalisation des malades	93
5.2.4.3. radiothérapie métabolique	93
5.2.5. Conclusion.....	94
5.3. Exposition professionnelle dans les centrales nucléaires	94
5.3.1. Exposition externe.....	96
5.3.2. Exposition interne	96
5.3.3. Conclusion.....	96
5.4. Risques radiologiques dans les mines d'Uranium	96
5.4.1. Identification des risques radiologiques	97
5.4.1.1. Exposition externe.....	97
5.4.1.2. Exposition interne.....	97
5.4.2. Conclusion.....	98
5.5. Exposition dans les autres étapes du cycle du combustible	98
5.5.1. Exposition dans les usines de traitement du minerai	98
5.5.2. Enrichissement de l'uranium.....	99
5.5.3. Fabrication du combustible	99
5.5.4. Retraitement des combustibles usés	99
5.5.5. Stockage des déchets radioactifs	99
5.5.6. Le démantèlement des installations.....	99
5.5.7. Transports des matières radioactives.....	99
5.5.8. Conclusion.....	100
5.6. Exposition dans les laboratoires.....	100
5.6.1. Laboratoires de radioanalyse	100
5.6.2. Recherche biomédicale.....	100
5.6.3. En conclusion	101
5.7. Autres expositions professionnelles.....	101
5.7.1. Exposition professionnelle lors des vols à haute altitude et des vols spatiaux	101
5.7.2. Exposition professionnelle dans le domaine militaire	101
5.7.3. Exposition dans les mines non uranifères.....	101
5.8. Au total.....	102
6. OBSERVATIONS CLINIQUES	104
6.1. Observation n°1.....	104

6.2. Observation n°2	106
6.3. Observations n°3, 4 et 5	108
6.4. Observation n°6	111
6.5. Observation n°7	113
7. REVUE DE LA LITTÉRATURE - DISCUSSION	116
7.1. Radiodermites chroniques et cancers cutanés	116
7.1.1. La pathologie	116
7.1.2. Premières observations rapportées	117
7.1.3. Observations rapportées en radiologie interventionnelle et discussion	117
7.1.3.1. Observations de la littérature	117
7.1.3.2. Moyens de prévention en radiologie interventionnelle	119
7.1.3.3. Discussion	120
7.1.4. Observations rapportés chez les chirurgiens-dentistes et discussion	121
7.1.4.1. Observations de la littérature	121
7.1.4.2. Moyens de prévention en radiologie dentaire	122
7.1.4.3. Discussion	123
7.2. Accidents d'irradiation	124
7.2.1. Exposition externe	124
7.2.1.1. Les accidents ayant pour origine des sources industrielles	124
7.2.1.2. Les accidents ayant pour origine des sources médicales	128
7.2.1.3. Les accidents d'irradiation dans les laboratoires de recherche	129
7.2.2. Exposition interne	129
7.2.3. Etudes réalisées en France	129
7.2.4. Place de nos observations 3,4 et 5 dans la littérature - Discussion	130
7.3. Leucémies et lymphomes non Hodgkiniens	132
7.3.1. Leucémies	132
7.3.2. Lymphomes non Hodgkiniens (LNH)	133
7.3.3. Lymphomes de Burkitt	135
7.3.4. Place de l'observation n°6 dans la littérature - Discussion	136
7.4. Cancers broncho-pulmonaires	137
7.4.1. Observations de la littérature	137
7.4.2. Discussion	139
8. RADIOPROTECTION	142
8.1. Réglementation	142
8.1.1. Sur la plan international et européen	142
8.1.1.1. Structures	142
8.1.1.2. Principes fondamentaux de la CIPR	143
8.1.1.3. Directives européennes	146
8.1.2. Réglementation française	146
8.1.2.1. Principaux textes législatifs et réglementaires	146
8.1.2.2. Nouvelle réglementation	147
8.2. Mesures de prévention	151
8.2.1. Prévention technique collective	151
8.2.1.1. Mesures administratives	151
8.2.1.2. Information et formation du personnel	151
8.2.1.3. Zones	152
8.2.1.4. Personne compétente en radioprotection	153

8.2.1.5. Protection contre l'exposition.....	153
8.2.1.6. Contrôles d'ambiance.....	154
8.2.1.7. Traitement des déchets radioactifs	154
8.2.2. Prévention technique individuelle	154
8.2.2.1. Principes.....	154
8.2.2.2. Contrôle du personnel	155
8.2.3. Prévention médicale	156
8.2.3.1. Surveillance médicale.....	156
8.2.3.2. Surveillance de l'exposition individuelle	159
8.3. Conduite à tenir chez la femme enceinte	160
8.4. Conduite à tenir en cas d'accident d'irradiation	161
8.4.1. Irradiation externe globale.....	161
8.4.2. Irradiation externe localisée	162
8.4.3. Contamination radioactive	162
8.4.3.1. Radiocontamination externe.....	162
8.4.3.2. Radiocontamination interne.....	163
8.5. Surveillance médicale post-professionnelle	164
8.6. Réparation	164
CONCLUSION	168
BIBLIOGRAPHIE	169

Introduction

Introduction

L'exposition professionnelle aux rayonnements ionisants est une nuisance relativement récente, comme toutes les expositions d'origine artificielle.

Les cancers pulmonaires par inhalation rencontrés dans les mines d'Uranium ont été les premières pathologies radio-induites décrites à la fin du XIX^{ème} siècle, puis sont survenues les radiodermites et les leucémies chez les physiciens et les radiologistes peu de temps après la découverte des rayons X (1895).

L'utilisation médicale des rayonnements ionisants date du début du XX^{ème} siècle. Les applications industrielles sont plus récentes et se sont développées il y a à peine une quarantaine d'années.

Actuellement, en France, plus de 240000 travailleurs répartis dans environ 20000 établissements appartenant à des secteurs d'activités très divers peuvent être soumis à une exposition aux rayonnements ionisants. Les applications médicales de ces rayons emploient environ 140000 personnes. L'industrie nucléaire compte environ 80000 professionnels travaillant dans les centrales nucléaires ou dans les établissements intervenant dans les opérations du cycle du combustible. Les autres industries et la recherche emploient plus de 27000 personnes.

Dans ce travail, après avoir rappelé les différents types de rayonnements ionisants, les effets biologiques et cliniques seront abordés. Puis, les différentes utilisations de ces rayons sur le plan professionnel seront développées.

Cinq cas de patients ayant présenté une radiodermite aiguë ou chronique secondaire à l'exposition professionnelle seront étudiés. Puis deux observations cliniques dont nous discuterons du lien avec les rayonnements ionisants seront évoquées.

La réglementation en matière de radioprotection ainsi que la prévention technique et médicale seront enfin abordées.

1. Quelques pages d'histoire

1. Quelques pages d'histoire (97) (57)

Vers la fin du siècle dernier, les phénomènes associés à la décharge électrique dans les tubes à vide passionnent les physiciens. C'est au cours d'une expérience de ce type, en 1895, que W. Röntgen fait la découverte des rayons X : il entoure de papier noir un tube à vide ; lors de la décharge, un écran fluorescent placé à proximité s'illumine quand le faisceau de rayons cathodiques frappe le tube ; celui-ci émet un rayonnement inconnu pénétrant qu'il nomme rayons X. Lorsqu'on interpose la main sur leur passage, l'ombre des os de la main apparaît sur un écran ou une plaque photographique. W. Röntgen envoie cette photographie à plusieurs savants d'Europe. En 1896, Henri Poincaré émet l'hypothèse que les rayons X sont dus à la phosphorescence du verre du tube à vide.

1.1. L'Uranium

En 1896, Henri Becquerel découvre la radioactivité naturelle en effectuant une étude avec un sel d'Uranium qu'il expose au soleil pendant plusieurs heures puis le place sur une plaque photographique enveloppée de papier noir, celle-ci est impressionnée. H. Becquerel désire renouveler l'expérience quelques jours plus tard, alors qu'il a rangé les sels d'uranium et les plaques photographiques dans le tiroir. Lorsqu'il vérifie l'état d'une des plaques non utilisées, il constate que celle-ci est fortement impressionnée. L'Uranium est donc capable d'émettre, même sans apport extérieur de la lumière, un rayonnement pénétrant de nature inconnue. Il entreprend toute une série d'expériences pour déterminer les propriétés de ces rayons qu'il nomme rayons uraniens. Becquerel utilise un électroscope pour suivre leur intensité au cours du temps. Quelques mois plus tard, il s'aperçoit que le rayonnement émis par son échantillon n'a pas décliné en intensité et met en évidence le fait que c'est l'élément Uranium, le plus lourd des éléments alors connus et non le sel qui émet le rayonnement.

1.2. De nouveaux corps radioactifs : le Polonium et le Radium

En 1898, Pierre et Marie Curie vont reprendre le flambeau et vont découvrir que certains minéraux contenant de l'Uranium sont beaucoup plus actifs que l'Uranium lui-même. Après plusieurs mois de recherche, ils découvrent deux nouveaux éléments : le Polonium et le Radium. Ce dernier est un million de fois plus radioactif que l'Uranium. Le mot « radioactivité » est utilisé pour la première fois par Pierre et Marie Curie, il apparaît comme une propriété générale de la matière. Puis, ils mettent en évidence qu'un gaz radioactif s'échappe du Radium et du Thorium. L'émanation est appelée Radon pour le Radium et Thoron pour le Thorium, reconnus par la suite comme deux isotopes. Grâce au Polonium et au Radium, on distingue désormais des sources intenses et commodes pour étudier les rayons émis par les substances radioactives (rayons alpha, bêta et gamma). Le prix Nobel de physique de 1903 a été décerné conjointement à Henri Becquerel et Marie Curie.

1.3. Mise en évidence de « l'action physiologique » des rayonnements des corps radioactifs

En 1900, Walkoff et Giesel observent pour la première fois que les rayons du Radium agissent énergiquement sur la peau, donnant un effet analogue à celui produit par les rayons X. Pierre Curie, comme Giesel, en fait l'expérience en plaçant sur son bras une source de Radium et la laisse agir pendant dix heures. Il constate une rougeur, puis la formation d'une plaie qui mettra 50 jours à guérir.

En 1901, Danlos traite une dermatose, le lichen planus. Ces effets seront utilisés pour traiter des affections cutanées dont certains cancers. C'est le début de ce qu'on appellera la curiethérapie.

1.4. La radioactivité est la transmutation spontanée d'un élément chimique en un autre

Ernest Rutherford et Frederick Soddy font deux découvertes majeures. L'émanation émise par une source de Thorium décroît exponentiellement au cours du temps : en moins d'une minute, son activité diminue de moitié, et en moins de deux minutes, il n'en reste plus que le quart. Ce temps caractéristique est appelé « période ». En 1902-1903, ils découvrent également que la radioactivité est la transmutation spontanée d'un élément chimique en un autre, par émission de rayonnement. Les éléments radioactifs découverts jusque-là appartiennent à trois familles dont le parent est chaque fois un élément à vie extrêmement longue, présent depuis l'époque de la formation de la Terre. Cet élément se transforme en un autre, qui se transforme en autre, et ainsi de suite. Chacune de ces familles, de ces trois chaînes de radioactivité aboutit à un isotope stable du plomb.

Les trois familles radioactives et quelques uns des premiers corps radioactifs :

Corps radioactifs	Période	Rayons émis
Famille de l'Uranium		
Uranium 238	4,47 milliards d'années	Rayons α et γ
Uranium 234	250000 ans	Rayons α et γ
Radium 226	1600 ans	Rayons α et γ
Radon 222	3,82 jours	Rayons α
Polonium 210	138,4 jours	Rayons α
Famille du Thorium		
Thorium 232	14 milliards d'années	Rayons α et γ
Thorium 228	1,9 an	Rayons α et γ
Radon 220	56 secondes	Rayons α
Famille de l'Actinium		
Uranium 235 (identifié en 1939)	704 millions d'années	Rayons α et γ
Actinium 227	21,8 ans	Rayons β et α

1.5. De la découverte du noyau à la radioactivité artificielle

En 1911, E. Rutherford découvre l'existence d'un noyau au centre de l'atome ; celui-ci est le siège des phénomènes de radioactivité, de toutes les transmutations. En 1914, Rutherford réussit la première transmutation provoquée, que l'on appellera « réaction nucléaire », transformant un noyau d'azote en noyau d'oxygène.

En poursuivant ces expériences, Chadwick découvre en 1932 le neutron, constituant du noyau qui se révélera par la suite comme un élément essentiel intervenant dans les réactions nucléaires.

En 1932, Ernest O. Lawrence invente un accélérateur dans lequel des particules chargées tournent sous l'influence d'un champ magnétique, leur vitesse augmentant à chaque tour. Cette machine, appelée "cyclotron", marque une étape décisive dans le développement des accélérateurs, car elle permet d'accélérer des particules à des énergies beaucoup plus élevées et à moindre coût, que celles obtenues dans les autres accélérateurs.

En 1934, Frédéric et Irène Joliot-Curie découvriront la *radioactivité artificielle* : en bombardant une feuille d'aluminium avec des particules alpha, ils obtiendront du phosphore radioactif, le phosphore 30. Ils reçoivent le prix Nobel de chimie en 1935.

Cette découverte ouvre la voie à la réalisation des premières fissions artificielles. O. Hahn et F. Strassmann découvrent, en 1938, la fission de l'Uranium en montrant que du Baryum se forme par bombardement d'Uranium à l'aide de neutrons. En 1939, F. Joliot et ses collaborateurs mettent en évidence la libération de neutrons lorsque l'on provoque la fission d'un noyau lourd, ce qui implique la possibilité d'une réaction en chaîne, donc la libération d'énergie nucléaire.

Les applications qui en découlent ont permis d'importantes productions d'énergie, comme les piles atomiques qui deviendront les réacteurs des centrales nucléaires et la bombe atomique.

2. Les différents types d'irradiation

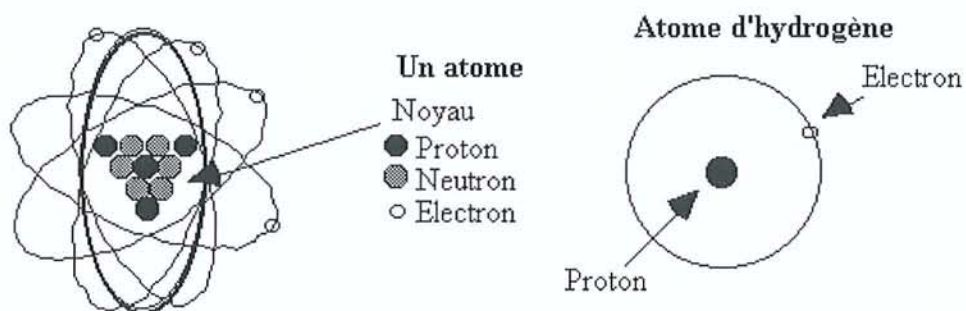
2. Les différents types d'irradiation (2) (1)

2.1. Bases physiques – notions élémentaires

2.1.1. L'atome et ses constituants

Un atome est constitué d'un noyau plus ou moins complexe autour duquel gravitent des électrons. Ce noyau est formé de deux types de particules (ou nucléons) : les protons et les neutrons.

A l'état naturel, le nombre d'électrons est égal au nombre de protons, ce qui permet la neutralité électrique de l'atome. Les électrons sont situés autour du noyau sur différentes orbites en fonction de leur niveau d'énergie et sont maintenus grâce à des forces de liaisons électrostatiques.



Représentation schématique des constituants d'un atome.

Un atome est caractérisé par son numéro atomique (Z) et son nombre de masse (A) :

- le numéro atomique Z correspond au nombre de protons dans le noyau (ou d'électrons orbitaires). Les atomes ayant le même numéro atomique Z appartiennent au même élément chimique ;
- le nombre de masse A d'un atome correspond aux nucléons c'est-à-dire à la somme de protons (charge électrique positive) et de neutrons (charge électrique neutre) dans le noyau.
- Le nombre de neutrons est noté N, si bien que $A = Z + N$

Notation : ${}^A_Z X$

X : Symbole chimique

Z : nombre de charges = nombre de protons = nombre d'électrons

A : Nombre de masse = Z + N

Des atomes ayant le même numéro atomique (Z) mais un nombre de masse (A) différent sont dits *isotopes* ; ils ont les mêmes propriétés chimiques mais des masses différentes. Ainsi, l'Uranium naturel ($Z=92$) est constitué de trois isotopes : l'Uranium 238 (99,3%, noté ^{238}U), l'Uranium 235 (0,7%, noté ^{235}U) et l'Uranium 234 (à l'état de traces).

Les *isobares* sont des atomes ayant le même nombre de masse (A) mais un nombre de charge (Z) différent.

Les *isomères* sont des noyaux identiques dans des états d'énergie différents.

2.1.2. Instabilité des noyaux atomiques (30)

Certains noyaux sont instables et se désintègrent spontanément en émettant différents types de rayonnements, chargés électriquement (émissions alpha et bêta) ou non (photons gamma ou rayons X). Les éléments dont le noyau se désintègre sont dits radioactifs ; on parle alors de *radioéléments ou radionucléides*.

Il existe trois causes d'instabilité :

- Le noyau est trop lourd ($A = Z + N > 200$),
- le noyau contient trop de neutrons par rapport au nombre de protons,
- le noyau contient trop de protons par rapport au nombre de neutrons.

Certains radioéléments dits naturels, existent dans la nature ; c'est le cas du Potassium 40 que l'on trouve dans tout organisme vivant, de l'Uranium naturel que l'on extrait de certains gisements miniers, mais qui se trouve à l'état de traces dans presque tous les sols ou du Carbone 14 produit par les rayonnements cosmiques.

Les plus nombreux sont créés artificiellement soit en irradiant des éléments naturels avec des faisceaux de particules, soit lors de la fission de l'uranium ; on parle alors de produits de fission, tels que le Césium 137, l'Iode 131 ou le Plutonium 239.

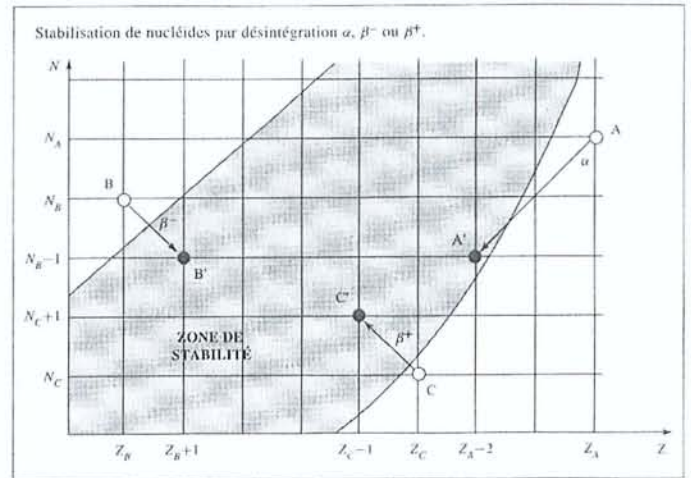
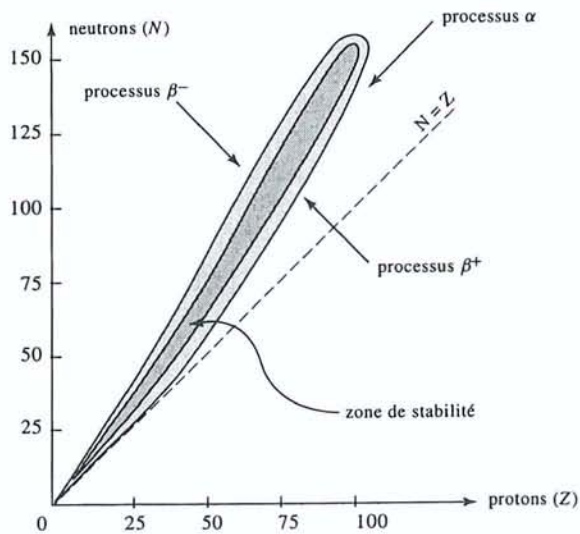
Il existe 276 noyaux stables sur plus d'un million de noyaux.

2.1.3. Stabilisation de radioéléments par désintégration α , β^- , β^+ (30)

Les noyaux stables sont ceux qui se trouvent dans la zone de stabilité : ils contiennent à peu près autant de protons que de neutrons pour $Z < 20$ puis quand A augmente, le lieu du noyau stable se déplace régulièrement vers un excès de neutrons.

Les nucléides naturels et artificiels instables (gris clair) se désintègrent par des processus α , β^- ou β^+ pour aboutir à un nucléide stable (gris sombre).

Processus de stabilisation de radioéléments par désintégration α , β^- , β^+



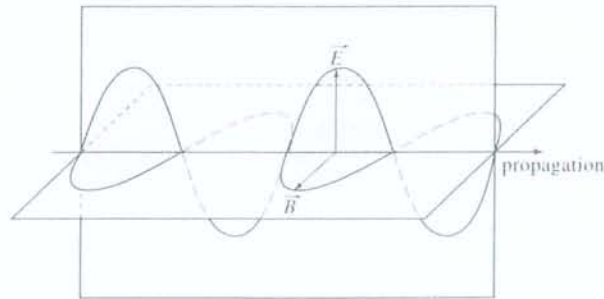
Source : CIPRIANI J. Optique, ondes, atome et noyau (30)

- Le noyau A est trop lourd ($N_A + Z_A > 200$). Il se stabilise en perdant une partie de sa masse sous la forme d'une particule alpha constituée de deux protons et deux neutrons et devient le noyau A', formé de $Z_A - 2$ protons et de $N_A - 2$ neutrons. A' est dans la zone de la stabilité : il est stable.
- Le noyau B est instable parce qu'il contient trop de neutrons par rapport au nombre de protons ; pour se stabiliser, un des neutrons se transforme en proton avec émission à grande vitesse d'un électron (particule β^-). B devient B', noyau stable contenant $N_B - 1$ neutrons et $Z_B + 1$ protons.
- Le noyau C contient trop de protons. Un proton se transforme en neutron avec émission d'un positon (β^+). C se transforme donc en C', noyau stable.

2.1.4. Ondes électromagnétiques (30)

La production d'un champ électrique \vec{E} ou magnétique sinusoïdal \vec{B} donne lieu à un phénomène de propagation : l'onde électromagnétique. Les champs électriques \vec{E} et magnétiques \vec{B} ne peuvent se propager indépendamment : la présence de l'un ne va pas sans celle de l'autre. D'une manière générale, toute charge accélérée émet des ondes électromagnétiques. Celle-ci peut être considérée comme associée à un flux de particules sans masse ni charge appelée photons.

Les ondes électromagnétiques progressives planes et sinusoïdales sont transverses.



Source : CIPRIANI J. Optique, onde, atome et noyau

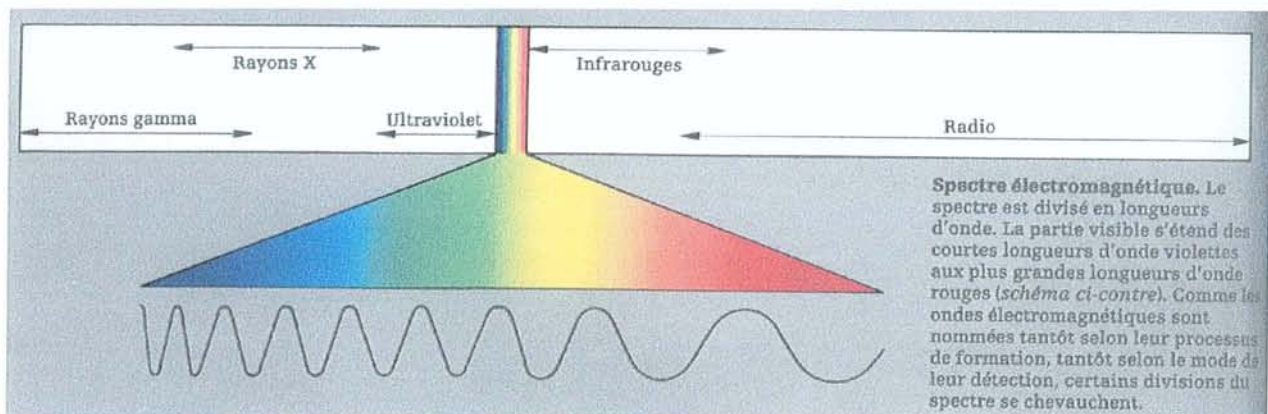
Les ondes électromagnétiques peuvent être émises :

- par des électrons de haute énergie ralentis dans des accélérateurs de particules : c'est le rayonnement de freinage ;
- par les noyaux atomiques lors de désintégrations ou lors de collisions à hautes énergies dans des accélérateurs de particules : c'est le rayonnement gamma ;
- par des électrons atomiques, il s'agit du rayonnement X, ultraviolet, visible ou infrarouge :
Lorsqu'un électron effectue une transition depuis un état initial d'énergie stationnaire E_1 vers un état d'énergie stationnaire E_2 , la différence d'énergie est émise sous la forme d'un photon unique tel que $E_1 - E_2 = h\nu$. (h représente la constante de Planck = $6,626 \cdot 10^{-34}$ J.s).
Inversement, l'énergie peut être absorbée par un électron selon le même principe.
Ce principe décrit le processus d'émission et d'absorption de la lumière par un atome.
- par des oscillations électriques dans des circuits : ce sont les micro-ondes, les ondes hertziennes (ondes radioélectriques).

Malgré ces processus d'émissions différents, ces ondes sont toutes de même nature. Les photons se déplacent à la même vitesse $c = 3 \cdot 10^8$ m. s⁻¹ dans le vide.

Leur énergie est inversement proportionnelle à leur longueur d'onde. Les rayons gamma et X ont une énergie importante mais une longueur d'onde courte tandis que les ondes hertziennes ont une énergie faible avec une grande longueur d'onde.

L'énergie E d'un photon est proportionnelle à la fréquence ν de l'onde électromagnétique qui l'accompagne : $E = h\nu$



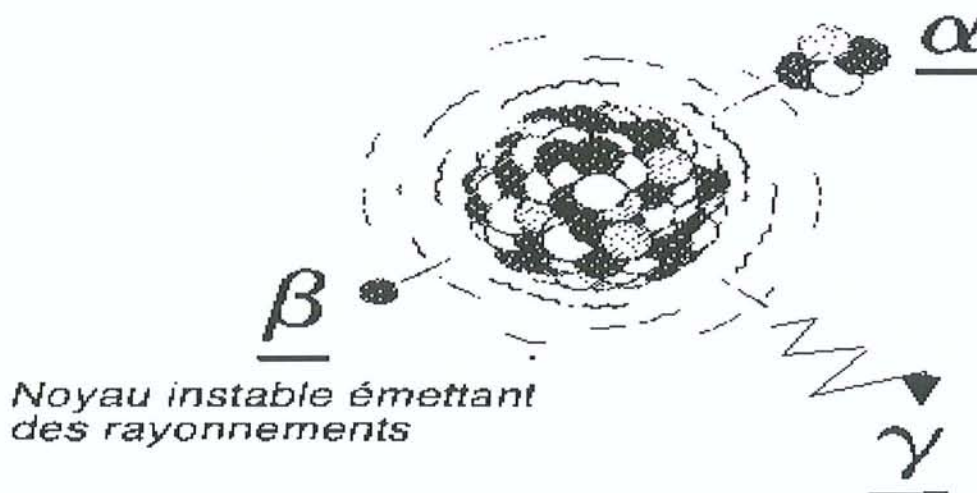
2.1.5. La nature des rayonnements ionisants (17) (18)

L'ionisation est atteinte si l'énergie apportée à un atome est suffisamment importante pour lui arracher un électron.

Un rayonnement ionisant est produit par des particules (matérielles ou non) qui fournissent à la matière, lors d'interactions individuelles, plus d'énergie qu'il n'en est nécessaire pour ioniser les atomes. L'énergie fournie doit être supérieure au potentiel d'ionisation le plus bas des atomes du milieu traversé.

Matériau	Potentiel d'ionisation	Matériau	Potentiel d'ionisation
H	15,6 eV	Cu	276 eV
Li	34 eV	Ag	418 eV
Be	60,4 eV	Sn	463 eV
C	76,4 eV	W	655 eV
Air	80,5 eV	Pb	705 eV
Al	150 eV	U	811 eV
Fe	241 eV		

En se désintégrant, les noyaux radioactifs vont émettre divers types de rayonnements qui peuvent être séparés en deux catégories : les rayonnements chargés électriquement ou non.



2.1.5.1. Les rayonnements chargés électriquement

♦ **Les rayonnements alpha (α)** sont des noyaux d'hélium constitués de deux protons et de deux neutrons, émis lors de la désintégration des atomes. Ils sont très ionisants du fait de leur double charge positive, mais peu pénétrants.



L'émission alpha est un effet de répulsion coulombienne (qui croît avec Z^2 , donc plus vite que les forces de liaisons qui augmentent avec A). Il s'agit d'une particule lourde qui interagit avec les électrons de l'atome, elle a une masse beaucoup plus importante que celle de l'électron. L'énergie de la particule est cédée aux électrons qu'elle rencontre.

Ces électrons vont alors :

- soit être éjectés si l'énergie donnée par la particule est suffisante (quelques eV),
- soit être excités, l'émission de particules alpha s'accompagne d'un rayonnement électromagnétique gamma de très grande fréquence. En effet, en revenant à son état fondamental, l'électron perd son énergie sous forme d'émission d'un photon gamma
- ou il y aura rupture de liaisons moléculaires.

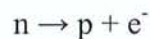
Les émetteurs des rayons alpha sont des noyaux lourds, la plupart de nombre atomique Z supérieur à 82.

Le parcours d'un rayon alpha est de quelques centimètres dans l'air et de quelques dizaines de micromètres dans la matière. Une feuille de papier suffit à les arrêter.

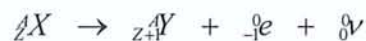
Si le parcours est très petit, l'ionisation spécifique est très importante : le nombre de particules ionisées par unité de longueur est très important.

♦ **Les rayonnements bêta (β) sont :**

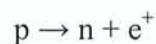
- soit des électrons porteurs d'une charge électrique négative (β^- ou négatons). Ils sont émis à partir d'un atome instable du fait d'un excès de neutrons. La transformation d'un neutron en proton donne lieu à l'émission d'un électron négatif :



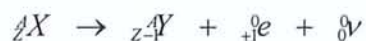
Outre l'émission de l'électron, il y a l'émission d'une autre particule sans charge, de masse très faible, très difficile à mettre en évidence expérimentalement, l'antineutrino $\bar{\nu}$. Le rayonnement β^- est souvent accompagné d'un rayonnement gamma dont l'origine est la même que la radioactivité alpha.



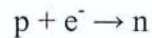
- soit des électrons porteurs d'une charge positive (positons ou β^+) (en cas d'excès de protons c'est la transformation inverse qui se produit et un électron positif est émis) :



seuls certains radioéléments artificiels peuvent être émetteurs β^+ . Outre le positon, il y a émission d'un neutrino ν



- Le processus inverse de l'émission est la capture : le noyau absorbe ou capte un de ses électrons orbitaux.



Sous le terme de désintégration bêta, on regroupe donc les processus suivants : l'émission d'un électron négatif (négaton), l'émission d'un électron positif (positon) et la capture d'un électron orbital.

Ils sont d'autant plus pénétrants que leur vitesse est élevée. Le nombre de masse ne change pas : c'est une transformation isobarique. Elle est possible quel que soit le nombre atomique.

C'est une interaction de type coulombienne. La cible a la même masse que la source, le transfert d'énergie sera donc plus important. L'électron envoyé dans la matière va subir d'importants changements de direction ; son parcours sera donc mal défini. Un faisceau monoénergétique ne l'est plus après la traversée de la cible.

Le parcours des rayons bêta est de quelques mètres dans l'air (3 mètres pour un rayon de 1 MeV) et de quelques millimètres dans la matière. Une feuille d'aluminium de quelques millimètres les arrête.

♦ Ces deux types de rayonnements (alpha et bêta) sont dits *directement ionisants* car ils arrachent des électrons à la matière dans laquelle ils se propagent ; les particules chargées sont entourées d'un champ électrique qui permet, lors des chocs, l'ionisation directe. Leurs collisions avec des électrons des atomes provoquent ionisation et excitation et sont à l'origine de ruptures moléculaires et de formation de radicaux. Ils ont un parcours généralement très court.

Ils sont donc peu dangereux en exposition externe. Par contre, leur fort pouvoir ionisant les rend très nocifs en exposition interne.

2.1.5.2. Les rayonnements non chargés électriquement

Les rayonnements corpusculaires correspondent à des neutrons, produits par des réactions situées au sein des noyaux. Les neutrons sont émis lors de la fusion de noyaux d'uranium ou au cours de bombardements nucléaires par un rayonnement alpha.

Ils sont très pénétrants s'ils sont rapides ; ils ne sont alors pas chargés électriquement et ne sont freinés que par choc direct contre les noyaux ou les électrons de la matière traversée.

S'ils sont lents, ils peuvent être capturés par les noyaux avec émission d'un photon gamma. Les neutrons sont indirectement ionisants car ils vont créer des particules énergétiques chargées.

Leur parcours est de quelques dizaines de centimètres dans la matière.

Les rayonnements électromagnétiques X ou gamma (γ) sont des photons et ont donc une nature et des propriétés analogues ; leur différence réside dans leur origine.

♦ *Les rayonnements gamma* sont émis au cours de désintégrations radioactives et ont donc une origine nucléaire. Ils sont émis lors d'un retour à l'état stable d'un noyau excité possédant un trop plein d'énergie. Les photons gamma sont émis depuis un noyau.

Les rayons gamma ont trois actions lorsqu'il existe un parcours dans un tissu et qu'il y a interaction avec les électrons des atomes :

- l'effet photoélectrique : le photon arrache un électron orbital de l'atome cible ; cet effet est prépondérant pour les énergies faibles comme par exemple le rayonnement X utilisé en radiographie et radiodiagnostic.
- L'effet Compton : le photon interagit avec un électron et perd une partie de son énergie = énergie diffusée. Cet effet prédomine pour les énergies intermédiaires.
- Matérialisation d'énergie : c'est ce qu'on appelle la production de paires ; le photon disparaît en créant une paire d'électrons c'est-à-dire un négaton et un positon. Cet effet concerne les photons de très forte énergie dans un champ électrique.

Le parcours des rayons gamma n'est pas précis, il est de quelques dizaines de mètres dans l'air et de quelques centimètres dans la matière. Pour absorber la moitié d'un rayon gamma de 1 MeV, il faut un centimètre de plomb.

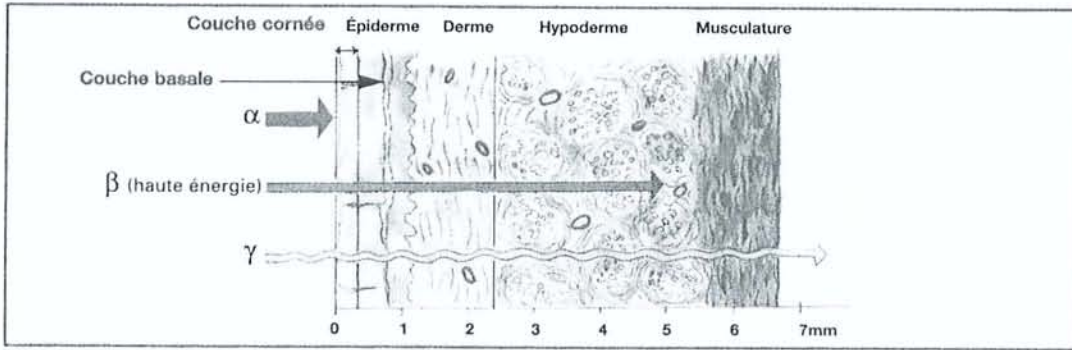
♦ *Les rayons X* sont émis lors d'interactions avec des électrons ; ils sont obtenus par bombardement d'une cible par un faisceau d'électrons accélérés dans le vide. Les photons X sont produits à l'extérieur du noyau, c'est-à-dire dans le champ électromagnétique qui l'entoure, ou dans son cortège électronique. Les photons présentent des énergies différentes : les rayons X peu pénétrants sont rapidement arrêtés par la peau, tandis que les plus énergétiques vont traverser le corps humain.

Le photon incident interagit avec les électrons périphériques, une partie de l'énergie du photon incident est transféré aux électrons périphériques, l'autre partie est diffusée sous la forme d'un photon : c'est l'effet Compton. Le rayonnement diffusé se fait dans toutes les directions. Les rayons X se propagent en ligne droite.

Le parcours des rayons X est de quelques dizaines de mètres dans l'air et de quelques centimètres dans la matière.

Ce sont des *rayonnements indirectement ionisants* car ils agissent par l'intermédiaire de particules chargées qu'ils mettent en mouvement lors d'interactions avec la matière. Les photons ont des interactions rares et aléatoires avec les électrons des atomes.

Ils sont fortement pénétrants mais peu ionisants. Les rayons gamma ont un pouvoir de pénétration plus important que celui des rayons X du fait d'une longueur d'onde plus courte. Ils peuvent traverser des épaisseurs importantes et sont donc très dangereux en exposition externe. Pour les arrêter, on dispose d'écrans protecteurs, tels que d'importantes épaisseurs de bétons, d'acier ou de plomb pour les rayons X ou gamma et d'écrans en paraffine pour les neutrons.



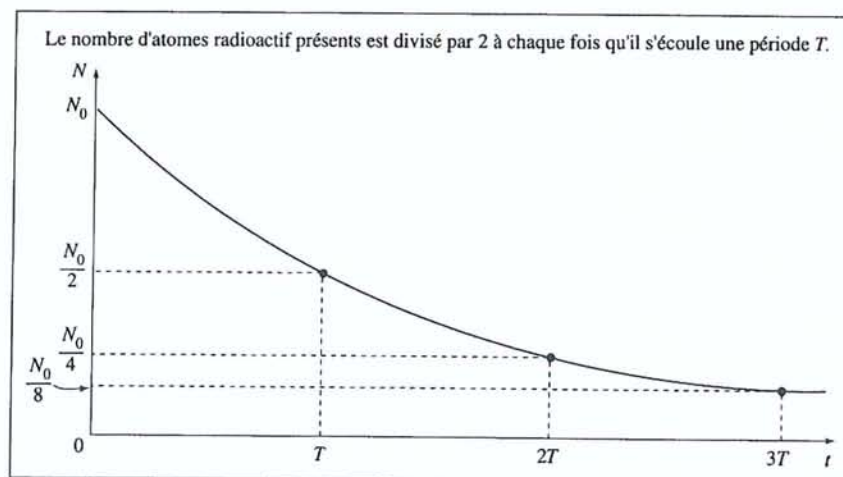
Pénétration des différents types de rayonnements ionisants dans le corps humain.

Source : DOLLO R. Principales unités utilisées en radioprotection. Sources de rayonnements ionisants (48)

2.1.6. Activité et période d'un radioélément (2)

Une source est caractérisée par l'activité d'un radioélément, c'est-à-dire le nombre de noyaux qui s'y désintègrent spontanément par seconde.

- L'unité de mesure de la radioactivité est le becquerel (Bq) : une substance radioactive présente une **activité** de un becquerel lorsqu'un noyau s'y désintègre chaque seconde. C'est une unité très petite. En pratique, on utilise des multiples du becquerel : kBq, MBq, GBq, TBq. Bien que le becquerel soit l'unité du système international, on utilise encore l'ancienne unité de la radioactivité : le curie (Ci). Un curie correspond à la radioactivité d'un gramme de radium dans lequel se produisent 37 milliards de désintégrations par seconde ($1 \text{ Ci} = 37 \text{ GBq}$).
- **La période radioactive ou demi-vie (T_p)** est le temps mis par la moitié des noyaux de la substance radioactive pour se désintégrer. L'activité est donc réduite de moitié au bout d'une période et du quart au bout de deux périodes. Les périodes sont très variables selon les éléments (8 jours pour l'Iode, 30 ans pour le ^{137}Cs , 24000 ans pour le ^{239}Pu)



Source : DUCASSOU D. Notions de physique nucléaire (2)

- **La période biologique** (T_b) d'un élément (radioactif ou non) correspond au temps nécessaire pour que soit éliminé naturellement par l'organisme la moitié d'une quantité absorbée par une voie quelconque.
- **La période effective** (T_e) d'un radioélément dépend de la période biologique (phénomène d'élimination) et de la période physique due à la désintégration nucléaire. Elle correspond à la diminution de moitié de l'activité présente dans l'organe (en l'absence d'apport).

La relation entre les différentes périodes s'écrit :

$$1/T_e = 1/T_p + 1/T_b$$

- Après absorption d'un radionucléide, **la dose engagée** (ou équivalent de dose engagée) correspond à la dose totale que recevra l'individu, soit jusqu'à élimination complète du radioélément (dépendant de T_p et T_b), soit pendant toute sa vie (en pratique, on admet par convention que l'espérance de vie après contamination est de 50 ans).

2.1.7. Action des rayonnements sur la matière (48)

En pénétrant dans la matière, les rayonnements interagissent avec les noyaux et les électrons des atomes traversés, ils perdent une partie de leur énergie qui est alors communiquée à la matière. Il en résulte principalement une ionisation et une excitation électronique du milieu.

Lors d'une ionisation, l'électron rompt sa liaison avec le noyau.

Dans une excitation, l'énergie communiquée à l'électron est trop faible pour l'arracher au noyau, il reste lié à la molécule et passe à un niveau d'énergie plus important correspondant à une orbite plus périphérique.

- Les ionisations se répartissent de manière irrégulière ; leur distribution dépend de la nature du rayonnement. On distingue souvent les rayonnements par leur **T.E.L.** (transfert linéique d'énergie) : ce paramètre permet de quantifier la distribution de la dose dans le temps et l'espace ; il est le reflet de la densité des ionisations le long de la trajectoire d'une particule.
- **L'électron Auger** : lorsque le noyau d'un atome contient un excès de protons, un électron des couches profondes est capturé par un proton du noyau. Le comblement de la vacance créée, libère une certaine quantité d'énergie qui peut être communiquée à un électron périphérique qui rompt sa liaison avec le noyau et est alors éjecté. C'est ce dernier qui est appelé électron Auger.
- **Le rayonnement de freinage** : lors de l'interaction de l'électron avec un noyau, il se produit un changement de direction de l'électron. Celui-ci s'accompagne de l'émission d'un photon gamma dont l'énergie est prélevée sur celle de l'électron incident qui est donc ralenti ; le rayonnement émis est désigné sous le nom de rayonnement de freinage.
- **La dose absorbée (D)** : lorsque les rayonnements émis rencontrent la matière, ils lui cèdent de l'énergie ; la quantité d'énergie communiquée à la matière par unité de masse est appelée dose absorbée ; l'unité utilisée est le gray (Gy) ; l'ancienne unité était le rad = 0,01 Gy.

- **L'équivalent de dose (H)** : à dose absorbée égale, les effets biologiques seront différents en fonction de certains facteurs, dont la nature du rayonnement et les conditions d'exposition. On a défini une valeur Q, dite facteur de qualité, qui est le reflet de la nocivité plus ou moins importante du rayonnement. Ainsi pour une même dose absorbée, les rayons alpha sont beaucoup plus destructeurs que les rayons gamma. Les rayons X, photons gamma ainsi que les particules bêta ont été pris comme référence Q = 1 et on a estimé que pour les rayons alpha, Q = 10 à 30 et pour les neutrons, Q = 5 à 20 selon leur énergie.

L'équivalent de dose est égal à la dose absorbée multiplié par le facteur de qualité : $H = D \times Q$.
L'unité est le sievert (Sv ; ancienne unité : le rem : 1 rem = 0,01 Sv).

- **Le débit de dose** : il est important de connaître le temps pendant lequel une irradiation a été reçue ; aussi on définit le débit de dose, c'est-à-dire la dose reçue par unité de temps, qui s'exprime en gray par heure.
- Lorsqu'il existe une irradiation d'un ou plusieurs organes dans lesquels se sont fixés des radioéléments absorbés, ces différents organes n'ont pas la même radiosensibilité. Ceci signifie qu'un même équivalent de dose n'aura pas la même efficacité pour induire un effet nocif suivant l'organe qui l'a reçu. Pour tenir compte de cela, on introduit un coefficient de pondération (WT) par lequel il faut multiplier l'équivalent de dose (H) reçu par un organe pour rendre compte du risque biologique. Ce produit $H \times WT$ est appelé **équivalent de dose efficace (He)**.

Exemple :

Pour une irradiation homogène de l'organisme entier, $WT = 1$ d'où $He = H$.

Pour une irradiation du poumon, $WT = 0,12$ d'où $He = 0,12H$,

donc un équivalent de dose de 1 Sv reçu par les poumons provoquera le même risque de cancérisation qu'un équivalent de dose de 0,12 Sv reçu par l'organisme entier car dans les deux cas l'équivalent de dose efficace est de 1 Sv.

Rappel des grandeurs utilisées en radioprotection :

Grandeurs	Unités	Définitions
Activité	Becquerel (Bq)	Nombre de désintégrations par seconde
Dose absorbée	Gray (Gy) 1 Gy = 1 joule par kilo	Energie communiquée à la matière par unité de masse
Equivalent de dose (H)	Sievert (Sv)	Effet biologique sur les tissus irradiés
Débit de dose absorbée	Gray par heure (Gy/h)	Energie reçue par la matière irradiée par unité de masse et unité de temps

2.1.8. Les modes d'exposition aux rayonnements

2.1.8.1. Position de la source par rapport à la personne exposée

Les rayonnements peuvent être émis par une source extérieure à l'organisme (rayons X, gamma et neutrons) ; on parlera alors d'*exposition externe*. Si la source se situe à distance de la personne et l'atteint, on parlera d'*irradiation externe* ; si la source (uniquement pour les sources scellées) se situe au contact de la peau, on parlera de *contamination externe*.

Sous le terme de contamination, on entend la présence indésirable à un niveau significatif pour l'hygiène de substances radioactives à la surface ou à l'intérieur d'un milieu. Ainsi l'atmosphère, les sols, les locaux où les individus peuvent être contaminés. La contamination entraîne l'irradiation des volumes proches.

Les rayonnements peuvent être émis par des radioéléments intérieurs à l'organisme (rayons alpha et bêta) ; il s'agit d'une *exposition interne* entraînant une *irradiation interne*. Lors d'une exposition interne, l'absorption des radioéléments en milieu de travail a pu se faire soit par voie respiratoire (inhalation de particules en suspension dans l'air ambiant), soit par voie cutanée lors de blessures. La voie digestive comprenant l'ingestion de substances radioactives contenues dans les liquides et les aliments ou leur présence sur des objets et les mains, se rencontre beaucoup plus rarement.

Du fait de leurs propriétés, les rayonnements n'ont pas les mêmes effets : ainsi les rayonnements alpha et bêta sont peu dangereux en exposition externe mais nocifs en exposition interne, contrairement aux rayonnements X, gamma ou aux neutrons qui sont plus dangereux en exposition externe.

2.1.8.2. Effets de l'irradiation

Ils dépendent :

- de la nature du rayonnement et de son origine,
- de la durée de l'exposition (pour une source donnée, les effets observés sont plus sévères si l'exposition est plus longue ; pour une dose absorbée donnée, les effets sont plus sévères si l'exposition est brève que si elle est étalée dans le temps),
- de la portion de l'organisme qui a été irradiée (une dose massive délivrée à l'organisme entier peut entraîner la mort, alors que la même dose reçue par un segment corporel ne provoque que des lésions locales),
- de la nature de l'organe (ou des organes) irradié(s) : les différents tissus n'ont pas la même importance vitale ; ils n'ont pas plus la même radiosensibilité. Les cellules les plus fragiles sont celles qui sont le moins différenciées et/ou qui se divisent le plus rapidement : cellules souches des organes hématopoïétiques, embryons...,
- de l'origine de l'irradiation (l'irradiation externe est de meilleur pronostic que l'irradiation interne).

2.1.8.3. Effets de la contamination interne

Plusieurs facteurs influent sur la nocivité de la contamination interne :

- la voie et la cinétique d'absorption ; les produits de fission et les transuraniens (tel que le plutonium) sont les plus dangereux par inhalation car ils ne sont que faiblement absorbés par voie digestive, à l'exception du Strontium, du Baryum, du Tellure, de l'Iode et du Césium. Par exemple, la stagnation d'un radioélément peu absorbable au niveau des voies respiratoires peut être responsable d'effets locaux à court et à long terme,
- la quantité absorbée, la nature du radio-isotope et de sa toxicité chimique (par exemple, l'Uranium est toxique pour les tubules rénaux indépendamment de ses propriétés radioactives), l'énergie du rayonnement,
- les organes concernés (la distribution dans l'organisme) et le lieu de son émonctoire. Le radioélément peut se concentrer sélectivement au niveau d'un organe critique. Par exemple, l'iode au niveau de la thyroïde, le strontium au niveau de l'os,
- le temps : d'une part la radioactivité décroît avec le temps, d'autre part l'organisme élimine et se renouvelle. Deux facteurs déterminent donc la durée de la nocivité du radio-isotope absorbé : la demi-vie radioactive (T_p) et la demi-vie biologique (T_b).

2.2. Irradiation naturelle par les rayonnements ionisants (86)

L'exposition naturelle aux rayonnements ionisants existe depuis l'origine de la vie de la Terre ; elle représente la principale composante de l'irradiation que nous recevons en permanence. On en distingue deux origines : cosmique et tellurique.

2.2.1. Le rayonnement cosmique

Les rayonnements cosmiques de haute énergie (provenant du Soleil et de d'autres étoiles) interagissent avec les noyaux des atomes de l'atmosphère terrestre. Ils créent d'une part un rayonnement secondaire formé de particules de haute énergie (muons, électrons...) qui engendrent une exposition externe et d'autre part des radio-isotopes qui participent à l'exposition interne.

2.2.1.1. Irradiation externe

La dose reçue varie principalement avec l'altitude (elle double tous les 1500 mètres environ) et, à un moindre degré, avec la latitude (maximale aux pôles et minimale à l'équateur). Elle représente en moyenne 0,35 mSv par an.

2.2.1.2. Irradiation interne

Des éléments radioactifs formés par l'action des rayons cosmiques sur les atomes de l'air (^3H , ^7Be , ^{14}C , ^{22}Na) peuvent être retrouvés à l'état de traces dans le corps humain. Parmi ces derniers, le Carbone 14 est produit par l'interaction des neutrons du rayonnement cosmique

sur les noyaux d'azote atmosphérique. Leur contribution à l'irradiation naturelle humaine est extrêmement modeste avec des équivalents annuels de dose efficace estimés à 0,01 μSv pour le Tritium, 3 μSv pour le Béryllium 7, 12 μSv pour le Carbone 14 et 0,2 μSv pour le Sodium 22.

2.2.2. Le rayonnement tellurique

Il provient des radioéléments à vie longue présents dans la croûte terrestre depuis la formation de la terre il y a 4,5 milliards d'années. Parmi ceux-ci, on citera principalement :

- le Potassium 40 (période = 1,28 milliards d'années),
- le Rubidium 87 (période = 47 milliards d'années),
- l'Uranium 238 (période = 4,47 milliards d'années)
- le Thorium 232 (période = 14,1 milliards d'années),
- l'Uranium 235 (période = 704 millions d'années),

Les deux premiers radioéléments sont des isotopes isolés et représentent une activité très faible. L'Uranium 238, le Thorium 232 et l'Uranium 235 représentent les trois familles radioactives essentielles que l'on distingue actuellement. Leurs descendants (en particulier le Radon et le Thoron) participent de façon importante à l'exposition interne mais également à l'exposition externe.

2.2.2.1. Irradiation externe

Il s'agit d'une irradiation par les rayonnements gamma émis lors de la désintégration des radionucléides de la croûte terrestre, variable en fonction de la nature du sol. En France, elle varie de 0,2 mSv à 0,8 mSv par an avec une moyenne de 0,4 mSv ; elle est surtout élevée dans les régions granitiques de Bretagne et du Massif Central. Dans le Kerala, en Inde, comme dans d'autres régions du monde où le sol est très riche en Thorium, elle peut dépasser 15 mSv par an.

2.2.2.2. Irradiation interne

Elle représente les deux tiers de l'irradiation naturelle. Elle provient :

- de radionucléides présents en petite quantité dans l'alimentation ou l'eau de boisson, délivrant en moyenne 0,35 mSv par an ; la moitié est due au Potassium 40, un tiers au Plomb 210 et au Polonium 210 (descendants de l'Uranium 238),
- mais surtout du Radon (^{222}Rn) et du Thoron (^{220}Rn), gaz radioactifs provenant respectivement de la dégradation de l'Uranium et du Thorium. Le Radon 222 se désintègre en quatre produits de filiation (Polonium 218, Plomb 214, Bismuth 214 et Polonium 214) dont l'action n'est pas dissociable de celle du radon. Éléments solides, ils sont adsorbés sur des particules d'aérosols qui, après inhalation se déposent à la surface de l'arbre trachéo-bronchique. Le thoron et ses produits de filiation, en raison de leurs périodes plus courtes, contribuent à une dose six fois moins importante que celle du Radon.

A l'extérieur des habitations, la concentration du Radon dans l'air varie peu (1 à 10 Bq par m³ d'air). Par contre, à l'intérieur des habitations, les variations sont considérables (1 à 10000 Bq par m³ d'air), liées à la nature des sols, des matériaux de construction et à la ventilation (les faibles renouvellement d'air augmentent la concentration en Radon) ; en France, les valeurs mesurées varient de 3,7 à 850 Bq par m³.

L'UNSCEAR (United Nations scientific committee on the effects of atomic radiations), à partir de mesures faites dans les habitations de la plupart des régions tempérées du globe, estime qu'en moyenne la concentration équivalente de radon, à l'équilibre avec ses produits de filiation, est de 20 Bq par m³ d'air, qui correspond pour l'habitant à un équivalent de dose efficace annuel de 1 mSv.

Au total, l'exposition individuelle moyenne due à la radioactivité naturelle est de 2,4 mSv par an (équivalent de dose efficace).

Equivalents de dose efficace annuels d'origine naturelle (d'après l'UNSCEAR, 1988).

Origine de l'irradiation	Equivalent de dose efficace par an (mSv)		
	Irradiation externe	Irradiation interne	Total
Rayonnement cosmique	0,355	0,015	0,37
Rayonnement tellurique			
- ⁴⁰ K	0,15	0,18	0,33
- ⁸⁷ Rb		0,006	0,006
- Famille de ²³⁸ U (dont radon)	0,1	1,24	1,34
- Famille de ²³² Th (dont thoron)	0,16	0,18	0,34
Total	0,8	1,6	2,4

2.3. Irradiation artificielle due à l'activité humaine : principales origines

Les rayonnements, qu'ils soient d'origine naturelle ou artificielle sont de même nature, et à dose égale ont les mêmes effets. L'exposition aux rayonnements ionisants due à l'activité humaine contribue à environ un quart de l'irradiation reçue par l'homme dans les pays développés.

2.3.1. Exposition du public

Selon les recommandations de la C.I.P.R. 60 (Commission Internationale de Protection Radiologique : publication 60), les doses limites d'exposition pour le public sont les suivantes : la dose effective (ou équivalent de dose) maximale est de 5 mSv par an et la dose effective maximale pour la peau et les organes isolément est de 50 mSv par an.

2.3.1.1. Irradiation médicale

Elle représente la principale source d'irradiation humaine non naturelle.

La dose individuelle moyenne est très variable et estimée à 1 mSv dans les pays développés. Dans ces pays, le nombre moyen d'examens radiologiques par an pour 1000 personnes est de 800 contre moins de 30 dans les pays aux structures de santé les moins développées.

Le radiodiagnostic fournit la majeure partie de la dose, avec pour un même examen radiologique, une dose délivrée qui varie de façon importante selon les techniques utilisées et les méthodes d'évaluation. L'amélioration des techniques a permis de réduire les doses délivrées.

Doses moyennes délivrées lors de quelques examens radiologiques

Radiographie	Dose à la peau (mSv)	Equivalent de dose efficace (mSv)	Variations*
Thorax	0,7	0,1	(0,05-0,36)
Crâne	2	0,15	(0,13-1,35)
Abdomen	3	1,0	(0,3-4,5)
Urographie intraveineuse	20	3,5	0,7-10,4)
Transit oeso-gastro-duodénal	90	3,8	(1,2-9,4)
Lavement baryté	97	7,7	(4,6-10,2)
Scanner abdominal	-	2,6	-
Scanner thoracique	-	4,8	-

(*) Fourchette des estimations d'équivalent de dose efficace faites dans les différents pays (d'après UNSCEAR).

La radiothérapie et la curiethérapie fournissent des doses variables de 10 à 100 mSv ou plus et la médecine nucléaire (en diagnostic) fournit selon l'examen : 2 mSv à la thyroïde lors d'une scintigraphie thyroïdienne au ^{99m}Tc (Technétium 99m), 6 mSv au squelette pour une scintigraphie osseuse au ^{99m}Tc et jusqu'à 1 Sv pour d'autres examens. La radiothérapie et la médecine nucléaire délivrent des doses beaucoup plus élevées que les autres secteurs médicaux mais sur un nombre restreint de personnes. ; de plus, l'utilisation de la dosimétrie est rigoureuse contrairement au radiodiagnostic.

2.3.1.2. Irradiation non médicale

Les retombées radioactives des essais nucléaires aériens américains et soviétiques des années 50 et 60 continuent de provoquer une irradiation non négligeable. De 1945 à 1970, elles ont représenté l'équivalent de 4 années d'exposition naturelle. Les radionucléides les plus importants sont le Césium 137 et le Strontium 90, tous deux produits de fission de l'Uranium.

Certains biens de consommation peuvent entraîner une irradiation minime de la population. Citons les montres et les cadrans lumineux anciens rendus luminescents par des peintures au Tritium, les anciens appareils de télévision couleur, certains verres et céramiques...

Les utilisations industrielles des rayonnements ionisants sont nombreuses et en plein essor, qu'il s'agisse de stérilisation alimentaire ou de matériel médico-chirurgical, d'utilisation de traceurs radioactifs en recherche, de radiographies industrielles par rayons X ou de gammagraphie, d'applications à l'industrie chimique. Pour l'ensemble de la population, la dose due à ces diverses sources artificielles est infime, inférieure à 10 μ Sv par an.

Enfin, les doses reçues par la population du fait des rejets de centrales nucléaires en fonctionnement normal sont minimales.

2.3.2. Exposition professionnelle

En France, 240000 personnes (nombre en augmentation) sont soumises à une irradiation de par leur profession avec un équivalent de dose moyen de 1 à 1,5 mSv par an. Leur exposition est surtout externe et plus rarement interne (sources non scellées). Parmi les personnes professionnellement exposées, on peut citer :

- les professions médicales (radiologues, radiothérapeutes...) et paramédicales (manipulateurs radio, infirmières...)
- les travailleurs de centre de recherche utilisant des sources,
- les travailleurs de l'industrie nucléaire (centrale, cycle du combustible, mines...),
- les travailleurs de secteurs industriels variés utilisant des sources scellées ou non : radiographie industrielle, radioconservation des denrées, jauges radiométriques (niveau, densité ou épaisseur...)

2.3.3. Au total

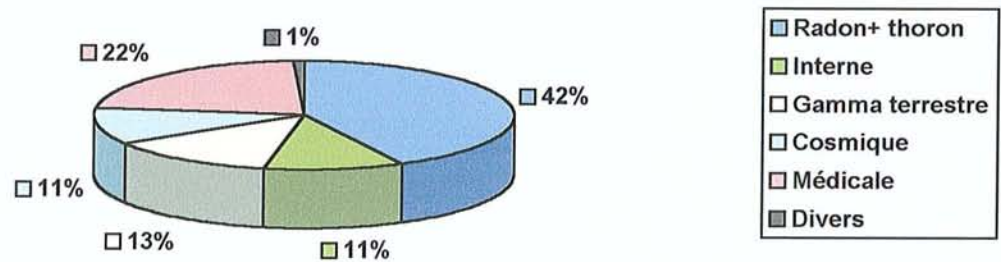
L'irradiation à partir des rayonnements ionisants liés à l'activité humaine reste très inférieure à l'irradiation naturelle. Les origines de l'irradiation artificielle restent très variées, mais les actes radiologiques médicaux sont responsables de la plus grande partie de la dose, elle-même variable en fonction du niveau de développement du pays.

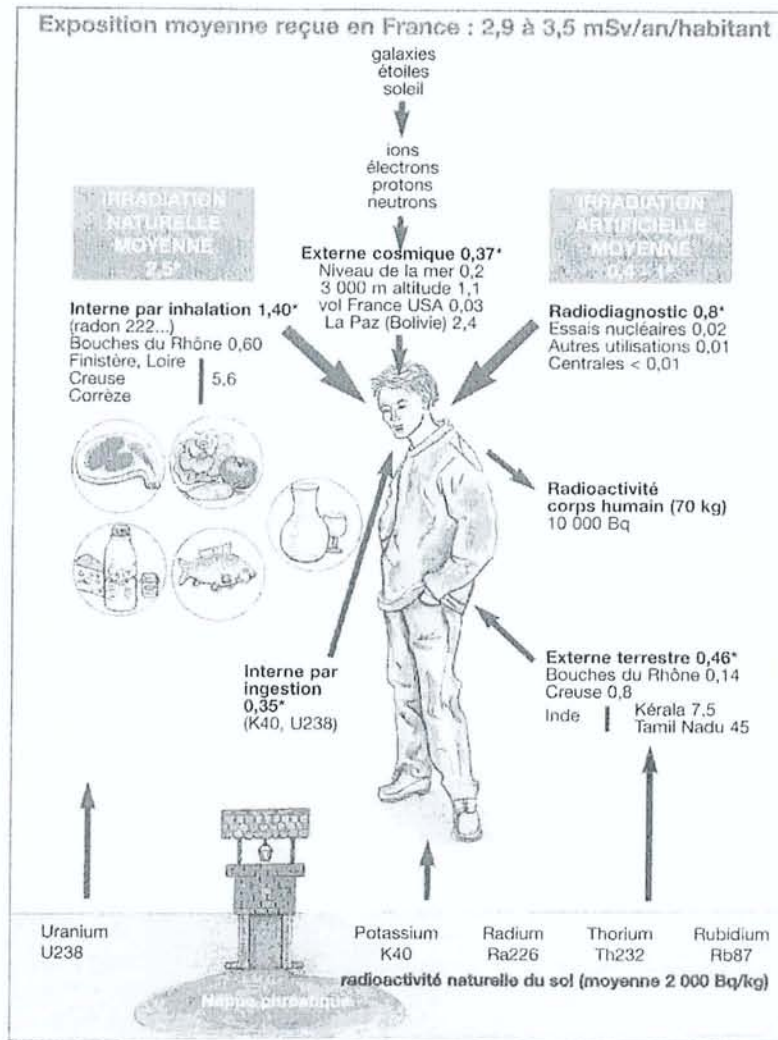
En France, on dénombre 5000 établissements ayant des appareils émetteurs de rayonnements ionisants ou de sources radioactives, 560000 appareils de radiologie médicale, dentaire ou vétérinaire, plus de 20 installations nucléaires de base et on compte 500000 transports de produits radioactifs par an.

Equivalents de dose efficace individuelles reçues annuellement par irradiation d'origine humaine (d'après UNSCEAR)

Origine de l'irradiation	Dose (mSv)
Irradiation médicale	0,4-1
Retombées d'essais nucléaires	0,01
Divers (biens de consommation et utilisation industrielle)	0,01
Professionnelle	0,002
Rejets de centrale nucléaire	<0,001
TOTAL	0,42 – 1,02

Répartition des différentes sources d'exposition pour la population





* Ces valeurs sont des moyennes par an et par habitant en France. Les autres valeurs sont des exemples correspondant à certaines zones géographiques ou à certaines utilisations de la radioactivité. Les fluctuations sont liées en particulier à la nature des sols et à l'altitude.

Source : DOLLO R. Principales unités utilisées en radioprotection. Sources de rayonnements ionisants (2)

L'exposition moyenne reçue en France (irradiation naturelle et artificielle) est de **2,9 à 3,5 mSv** par an et par habitant (2) (61).

3. Effets biologiques des rayonnements ionisants

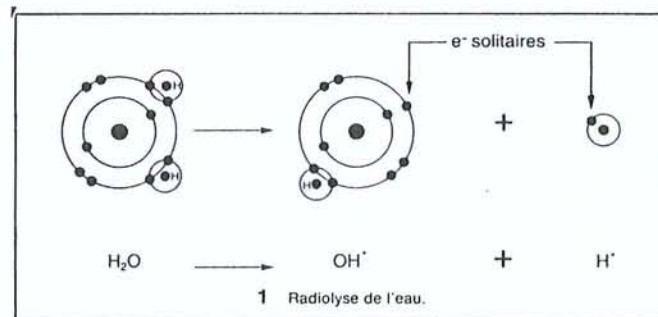
3. Effets biologiques des rayonnements ionisants (2) (1)

3.1. Effets moléculaires (58) (77)

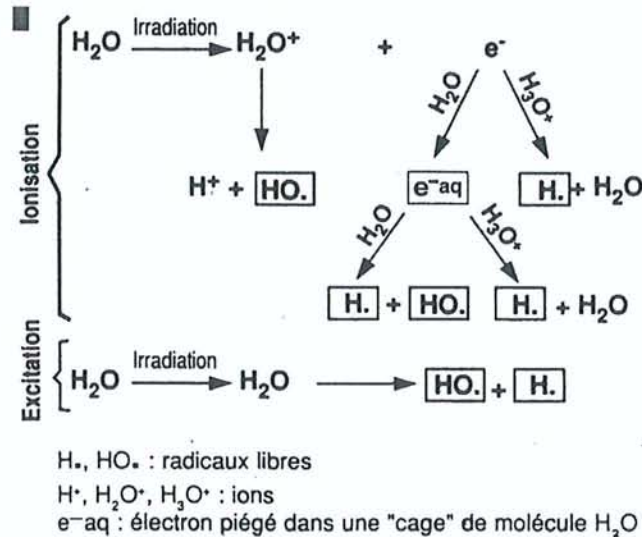
Les rayonnements ionisants agissent en transférant de l'énergie à la matière ; c'est cet excès d'énergie apporté à la molécule qui est responsable de lésions moléculaires. Dans une cellule vivante, toutes les molécules présentes peuvent être touchées. Cependant deux molécules ont une importance particulière : il s'agit de la molécule d'eau de par son abondance au sein des cellules et de la molécule d'ADN du fait des conséquences majeures pouvant être dues à la modification de sa structure. Les effets moléculaires sont soit directs, soit indirects.

L'action directe est due au transfert direct de l'énergie du rayonnement ; la molécule ionisée ou excitée devient instable et va expulser l'excédent d'énergie soit par émission de photons de fluorescence, soit par rupture de liaisons chimiques qui pourront être à l'origine de lésions moléculaires.

L'action indirecte est illustrée par la radiolyse de l'eau : sous l'influence des rayonnements ionisants, une molécule d'eau se décompose en deux radicaux libres (R .) porteurs d'un électron non apparié ou « célibataire ». Chimiquement instables et très réactifs ; il s'agit de substances oxydantes (OH.) et réductrices (H.). Les radicaux libres (OH. et H.) ainsi formés agissent à leur tour sur d'autres molécules initiant ainsi une cascade de réactions, entraînant de nouvelles lésions moléculaires. De nombreuses molécules (protéines, lipides, glucides, enzymes, ADN et ARN) peuvent être altérées par les rayonnements ionisants, les conséquences dépendent de l'importance biologique de la molécule lésée.



Source : ABADIA G. Effets des rayonnements ionisants. EMC (2)



Radiolyse de l'eau

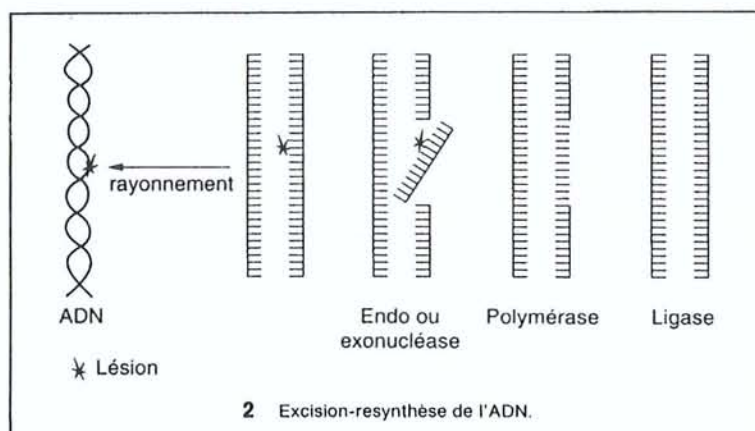
Source : LALLEMAND J. Effets biologiques de l'irradiation et conséquences pathologiques (77)

Les rayonnements entraînent des lésions de l'ADN qui sont soit secondaires à un effet indirect par radiolyse de l'eau, soit dues à un effet direct. La fréquence relative de ces lésions varie selon le type de rayonnement. Les principales altérations correspondent à :

- la rupture d'un ou des deux brins de la double chaîne,
- des modifications des bases ou des sucres,
- des pontages « cross links » intra ou intermoléculaires.

La réparation des lésions de l'ADN est réalisée grâce à différentes enzymes spécialisées. La plupart des ces lésions peuvent être réparées, surtout si elles ne touchent qu'un seul des deux brins de l'ADN et si elles sont éloignées dans le temps et dans l'espace.

Le système enzymatique le plus général correspond à une excision-resynthèse. Lors d'une cassure simple brin, la lésion est reconnue, incisée puis excisée (endo ou exonucléases) puis un nouveau fragment de chaîne est synthétisé en utilisant pour modèle le brin intacte (ARN polymérase puis ligase). Le temps de réparation est assez rapide : quelques minutes à quelques heures, suivant la taille de la brèche. En cas de cassure double brin (lésions des deux chaînes), la réparation est beaucoup plus complexe et peut être en cas d'erreur à l'origine de mutations.



ABADIA G. Effets des rayonnements ionisants. EMC (2)

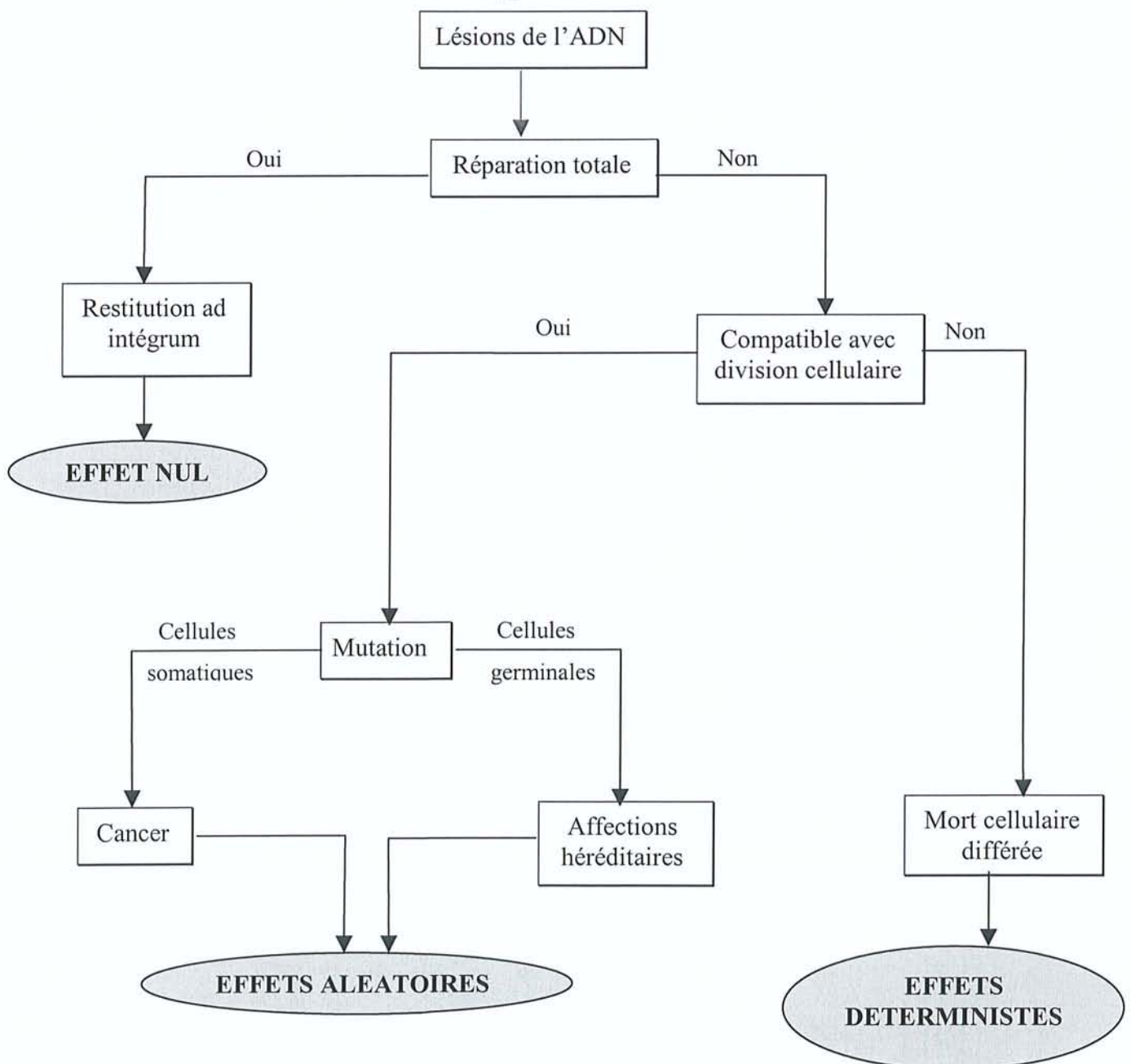
Les autres systèmes de réparation, notamment le système SOS, interviennent surtout lorsque le premier système est saturé. Ils peuvent dans certains cas induire des erreurs.

Ces mécanismes de réparation peuvent néanmoins être pris en défaut ou saturés, notamment par une irradiation à forte dose et à débit élevé. On aboutit à la définition du seuil : seuil de dose, seuil de débit de dose qui correspondent à cette saturation et qui permettent de mieux comprendre les différences d'efficacité des irradiations délivrées à fort et à faible débit de dose.

Les conséquences des lésions de l'ADN peuvent se diviser en deux grands types : les phénomènes de mortalité cellulaire et les mutations.

3.2. Effets cellulaires (58) (77)

Les différents types d'effets cellulaires



Les atteintes cellulaires dépendent étroitement des lésions moléculaires. Les différentes éventualités sont représentées sur le schéma précédent.

- le plus souvent, les lésions sont fidèlement réparées et la cellule endommagée redevient normale. L'effet de l'irradiation est donc nul.

Si les lésions sont non ou mal réparées, deux situations peuvent se présenter :

- Perte de la viabilité de la cellule ou incapacité de la cellule à se diviser, il s'agit de la mort cellulaire.
- Modification permanente du patrimoine héréditaire de la cellule, c'est la mutation.

3.2.1. Mort cellulaire (2) (1)

Les lésions moléculaires peuvent engendrer une *mort cellulaire immédiate* si la dose reçue est très élevée (quelques centaines de grays).

Le plus souvent si la dose est plus faible, on observe une *mort cellulaire différée*, c'est-à-dire que les cellules ont perdu leur capacité de division ; certaines meurent à leur première mitose, d'autres subissent quelques divisions avant de disparaître. Ces conséquences sont responsables des effets dits déterministes (cf. infra).

Les effets biologiques surviendront si le nombre de cellules mortes dépasse la capacité de réparation de l'organisme. Cela explique la notion d'effet « à seuil » qui ne se manifeste que si la dose reçue est supérieure à une « dose-seuil » caractéristique pour chaque effet.

De nombreuses études ont été réalisées par clonage des cellules *in vitro* puis surtout *in vivo*. Cette dernière technique permet ainsi de quantifier la survie cellulaire en fonction de la dose, après radioexposition d'une population cellulaire. Le taux de cellules survivantes est représenté en fonction de la dose sous forme de courbes appelées courbes de survie.

La forme des courbes de survie et les taux de survie varient en fonction du type cellulaire et, pour un même type cellulaire, en fonction des conditions expérimentales.

- ◆ Certaines *courbes* (virus, bactéries, cellules de mammifères dans certaines conditions) sont *exponentielles* (droites en coordonnées semi-logarithmiques). Elles permettent de déduire la dose D_0 , appréciant la radiosensibilité cellulaire (D_0 est la dose pour laquelle 37 % des cellules sont survivantes). Le modèle mathématique correspondant à ce type de courbe est dit « modèle de la cible unique à un coup » : les cellules contiendraient une cible d'emblée létale si elle est touchée (événement aléatoire) ; plus la cible est grande, plus la D_0 est faible. La population est d'autant plus radiorésistante que la D_0 est élevée.

Ce modèle est représenté mathématiquement par la relation :

$$S = \exp(-D/D_0)$$

Où S représente la fraction des cellules survivantes

- ◆ La plus souvent, les courbes obtenues sur les cellules de mammifères sont des *courbes avec épaulement* ; elles sont arrondies à l'origine, suivies d'une partie linéaire (en coordonnées semi-logarithmiques). L'importance de l'épaulement peut être appréciée en

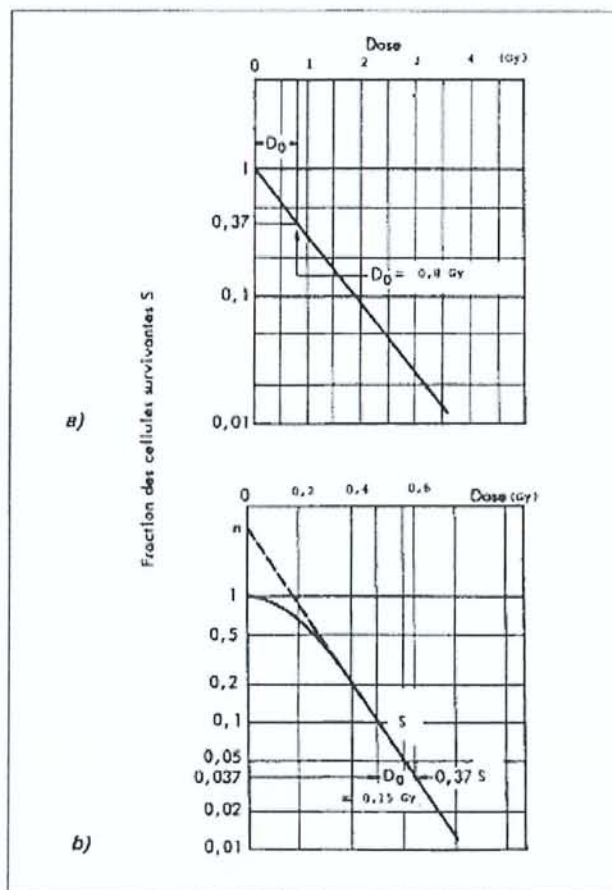
extrapolant la partie linéaire jusqu'à l'axe des ordonnées à la valeur n , appelé nombre d'extrapolation. D_0 peut être estimé dans la valeur linéaire. D_0 et n sont des facteurs permettant de quantifier la radiosensibilité cellulaire. Pour ce type de courbe, un modèle propose l'existence cellulaire de n cibles sub-létales : l'atteinte d'une des cibles n'engendre pas la mort cellulaire, il faut une accumulation de lésions sub-létales pour l'obtenir. Ainsi, dans l'épaulement, les cibles seraient touchées en nombre croissant et il ne resterait plus qu'une cible à atteindre dans la partie linéaire de la courbe.

Ce modèle permet d'expliquer pourquoi le fractionnement dans le temps d'une irradiation conduit à une plus grande survie cellulaire qu'une même dose délivrée en une seule séance. En effet, un intervalle de temps de quelques heures entre les séances permet aux cellules de réparer leurs lésions sublétales. Plus l'épaulement est important, plus le fractionnement protège. A l'inverse, s'il n'y a pas d'épaulement, une même dose, fractionnée ou pas, produit la même létalité cellulaire.

Ce modèle est représenté mathématiquement par la relation :

$$S = [1 - \exp (- D/D_0)]^n$$

Courbes de survie a) Exponentielle et b) Avec épaulement



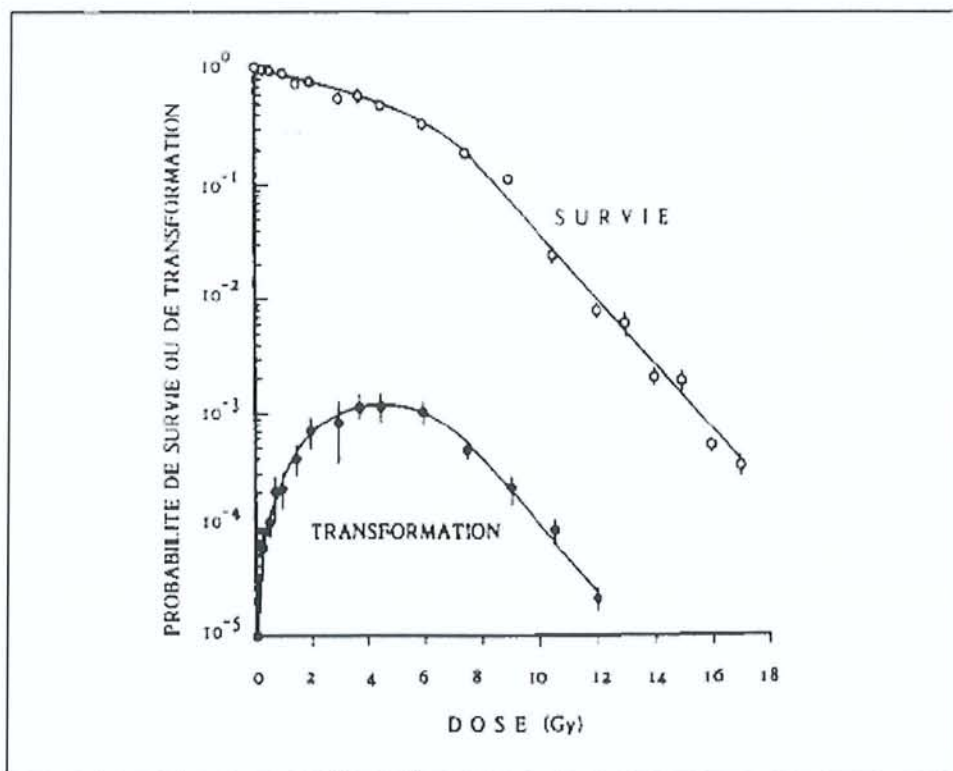
Source : Chevalier C. Effets moléculaires, cellulaires et tissulaires des rayonnements ionisants. DMT (2)

- ◆ Mais, même pour une dose très faible, la mortalité n'est pas nulle : ce phénomène a conduit à établir un modèle où la mort cellulaire pourrait être obtenue soit par atteinte des cibles sub-létales, soit par atteinte d'une cible létale d'emblée : c'est le modèle de la *courbe linéaire quadratique*

3.2.2. Mutations (2) (1)

Après lésion de l'ADN, les cellules peuvent conserver leur capacité de division, mais elles transmettent alors à leur descendance les anomalies induites : ce sont les mutations, pouvant engendrer des cancers si elles touchent les cellules somatiques et des anomalies héréditaires si elles affectent les cellules germinales. Ces conséquences constituent les effets aléatoires ou stochastiques que nous étudierons dans un autre chapitre.

La radioexposition de populations cellulaires peut provoquer in vitro des **transformations cellulaires** qui, après plusieurs générations, vont devenir identifiables (clones de cellules transformées). Ces modifications (notamment prolifération illimitée) sont en relation avec des atteintes de l'ADN (initiation), dont l'induction obéit au modèle linéaire quadratique. Aux faibles doses, la transformation cellulaire est faible, elle croît avec la dose, atteignant un sommet, puis diminue, « relayée » par la mort cellulaire quand la dose devient trop importante. A partir du sommet, les courbes de transformation cellulaire et de survie sont parallèles. La probabilité de survie est toujours très supérieure à la probabilité de transformation. Ces étapes de mutation du génome ne conduisent pas obligatoirement à une transformation maligne, car d'autres étapes sont nécessaires dont la possibilité pour une cellule transformée d'induire une tumeur au sein d'un organisme (animal) : c'est la promotion.



Courbes de survie et de transformation cellulaire

Source : Chevalier C. Effets moléculaires, cellulaires et tissulaires des rayonnements ionisants. DMT (2)

Quant aux **mutations génétiques**, les courbes ont une forme identique à celle de la transformation cellulaire. Le type de mutations induites par les rayonnements ionisants ne diffère pas de celui des autres mutagènes.

3.2.3. Facteurs de la radiosensibilité cellulaire (37)

On distingue cinq principaux types de facteurs de radiosensibilité cellulaire :

- Radiosensibilité intrinsèque :

Elle est très variable d'un type cellulaire à l'autre. Si l'irradiation induit dans un tissu un nombre important de lésions létales d'emblée et si ce tissu n'a que de faibles capacités de réparation des lésions sublétales, on parlera de radiosensibilité intrinsèque élevée. Si au contraire, le nombre de lésions létales d'emblée est faible et si le tissu possède de fortes capacités de réparation, il sera (relativement) radorésistant. Toutes les situations intermédiaires peuvent être envisagées.

- Facteurs temps comprenant l'étalement et le fractionnement

L'étalement protège relativement mieux les tissus à renouvellement rapide que les tissus à renouvellement lent.

Le fractionnement permet entre deux séances de radiothérapie la réparation des lésions sublétales « réparables ». Il protège donc sélectivement les tissus à forte capacité de réparation (en pratique, ceux à prolifération lente) par rapport à ceux à faible capacité de réparation.

- Effet oxygène :

Les cellules en hypoxie sont deux fois et demi à trois fois plus résistantes aux radiations ionisantes que les cellules bien oxygénées. L'oxygène présent dans le milieu irradié augmente l'effet des radiations ionisantes en se combinant aux radicaux libres pour former des composés hyperoxygénés hautement toxiques.

- Qualité du rayonnement

Les rayonnements à TEL élevée (neutrons, alpha) sont, pour des doses absorbées égales, plus nocifs pour les tissus que les rayonnements de faible TEL (X, gamma, bêta) car ils possèdent une efficacité biologique plus élevée, leur densité d'ionisation sur leur trajet étant plus importante.

Cela a amené à définir une « efficacité biologique relative (EBR) » pour ces particules. L'EBR est égale au rapport :

$$\frac{\text{dose du rayonnement de référence (photons gamma du } ^{60}\text{Co)}}{\text{dose du rayonnement étudié}}$$

Les deux doses entraînant le même effet biologique

Par exemple, pour un certain type de neutrons :

$$EBR = \frac{7\text{Gy (} ^{60}\text{Co)}}{1\text{Gy (neutrons)}} = 7$$

signifiant que l'efficacité biologique relative de ces neutrons est 7 fois plus élevée que celle des photons gamma du Cobalt 60.

- Cycle cellulaire

Les rayonnements ionisants agissent au niveau du cycle cellulaire en provoquant un retard à la mitose (arrêt des cellules à la phase G₂ précédant la mitose). Ce phénomène est proportionnel à la dose, valable pour toutes les cellules en cycle. Selon le moment où l'on expose les populations cellulaires, il est possible de définir la radiosensibilité des différentes phases : G₂ et M sont les plus radiosensibles, S la plus radiorésistante.

3.3. Effets tissulaires (1)

Les tissus sont des systèmes en équilibre ; ils ont la propriété de compenser les pertes cellulaires par des phénomènes d'homéostasie favorisant une prolifération cellulaire. Les effets tissulaires sont les conséquences des effets cellulaires. Ils ne s'expriment que lorsqu'un nombre important de cellules est détruit (destruction non restaurée par les phénomènes d'homéostasie). Ils n'apparaissent ainsi qu'au-delà d'une dose seuil (événement déterministe alors que la lésion cellulaire est aléatoire), permettant d'établir une protection absolue avec des limites d'exposition adaptées. Au-delà de cette valeur, les effets sont d'autant plus importants que la dose est élevée. Les effets s'expriment différemment selon l'organisation du tissu touché et sa cinétique.

On distingue schématiquement deux types de tissus :

3.3.1. Les tissus compartimentaux

Ils sont organisés en trois compartiments :

- les cellules souches qui sont les cellules les plus indifférenciées. Elles se différencient pour alimenter le compartiment suivant et se divisent pour maintenir leur nombre stable ;
- les cellules en voie de maturation qui se différencient de plus en plus et perdent, à un certain stade de différenciation, la capacité de se diviser;
- les cellules fonctionnelles qui ne se divisent pas et dont la durée de vie est plus ou moins longue (200 jours pour l'épithélium vésical, 5 jours pour l'épithélium intestinal).

Les rayonnements ionisants affectent les cellules qui se divisent ; les cellules sont d'autant plus radiosensibles qu'elles sont indifférenciées et qu'elles ont un potentiel de prolifération plus grand.

Si la dose est faible, la mortalité cellulaire sera faible. Elle sera rapidement compensée par une augmentation de la prolifération cellulaire et le retour à l'équilibre se fera avant l'apparition d'un effet pathologique.

Ce n'est qu'à partir d'un certain taux de mortalité cellulaire, donc à partir d'une certaine dose seuil, que vont apparaître des effets dus à la déplétion cellulaire (épidermite, chute du nombre de cellules sanguines). La dose seuil varie non seulement en fonction de la radiosensibilité des

tissus, mais elle varie également en fonction de la capacité du tissu à compenser ses pertes. Les cellules spermatogènes et épithéliales digestives ont des radiosensibilités identiques. Cependant la dose seuil de l'épithélium intestinal est beaucoup plus élevée, de l'ordre de 10 grays, pour une exposition globale à fort débit alors qu'elle est de 0,1 gray pour les cellules spermatogènes.

L'effet pathologique n'est jamais immédiat. Il apparaît avec une latence qui ne dépend que de la durée de vie des cellules fonctionnelles ou plus généralement de l'ensemble de la durée de vie des cellules qui ne se divisent plus. La latence est de quelques jours pour l'apparition de troubles digestifs (diarrhées, hémorragies), de quelques semaines pour la baisse des spermatozoïdes, quelques mois pour l'apparition d'une cystite. De même, après une radioexposition médullaire globale, s'installent dans l'ordre la lymphopénie, la granulopénie, la thrombopénie et enfin l'anémie puisque les globules rouges ont une durée de vie beaucoup plus longue (120 jours) que les autres lignées (leucocytes : quelques jours).

Au-delà de la dose seuil, l'intensité des troubles croît avec la dose, puisque la mortalité cellulaire est d'autant plus importante que la dose est plus élevée. Pour la peau, on peut voir apparaître suivant la dose une épidermite sèche ou exsudative ou bien une nécrose.

La réparation des lésions s'effectue par repeuplement à partir du compartiment des cellules souches. Elle est d'autant plus longue que la dose est plus élevée (nombre de cellules souches atteintes), que leurs phénomènes d'homéostasie sont moins puissants, que leur cinétique est lente.

Il faut cependant noter que lors de l'exposition de la moelle, l'aplasie est plus précoce et la régénération plus rapide après des doses élevées.

Les tissus concernés sont l'épiderme, l'épithélium intestinal, le système hématopoïétique...

3.3.2. Les tissus non compartimentaux

Toutes les cellules se divisent, mais souvent très lentement, du fait d'une vie très longue. Après radioexposition, les cellules disposent donc d'un temps très long pour réparer leurs lésions. Le nombre de cellules qui se divisent est très faible, la mortalité cellulaire due aux rayonnements l'est aussi. La radiorésistance apparente des cellules est grande et les doses seuils sont élevées. En pratique, ces doses seuils ne sont atteintes qu'en radiothérapie, lors des expositions fractionnées (foie, thyroïde, endothélium vasculaire, rein). Au-delà de la dose seuil, la latence d'expression des lésions est très longue, n'engendrant pas d'effet précoce : l'hypothyroïdie peut n'apparaître que 10 à 15 ans après l'irradiation.

Les mécanismes d'homéostasie, s'ils sont très efficaces (hypertrophie compensatrice après hépatectomie partielle ou néphrectomie unilatérale), ne sont déclenchés qu'à partir d'une baisse notable du nombre des cellules, mais cette baisse est très lente. Ils induisent la division d'un grand nombre de cellules mais également la mort des cellules lésées. Les manifestations pathologiques surviendront ensuite rapidement.

Pour ces tissus, la dose est suffisamment élevée pour provoquer des lésions conjonctivo-vasculaires associées qui vont aboutir à des lésions dites « tardives », irréversibles (telle la cirrhose hépatique).

Les principaux tissus concernés sont le foie, le rein, la thyroïde, le poumon...

4. Effets sur l'homme

4. Effets sur l'homme

4.1. Effets déterministes

Ce sont des effets à *seuil* c'est-à-dire qu'ils ne surviennent qu'au-dessus d'une certaine dose. Au-dessus de cette valeur, les lésions sont observées chez tous les sujets irradiés et leur gravité augmente avec la dose. En revanche, aucun effet n'est décelable pour une dose inférieure au seuil. La dose-seuil (entre quelques grays et quelques dizaines de grays) varie selon trois facteurs : la dose, l'étalement dans le temps et le volume irradié (70).

Ce sont en général des effets *précoces* dues à des pertes cellulaires résultant de la déplétion (mort cellulaire) et de la repopulation. Ils se manifestent dans un délai qui va de quelques heures à plusieurs mois après l'irradiation. Leur délai d'apparition est égal à la durée de vie de la cellule considérée. Cette durée de vie est très variable d'un type cellulaire à l'autre : 15 jours pour les cellules de la peau, 74 jours pour les spermatozoïdes (80).

Ils peuvent être *réversibles* selon l'importance des lésions. Aujourd'hui, en milieu professionnel, ces effets ne sont constatés qu'après certains cas d'expositions accidentelles.

On distingue les irradiations globales (délivrées à tout l'organisme) et partielles (localisées à une partie de l'organisme) (2) (1).

4.1.1. Exposition externe globale (113) (1) (11)

Lorsqu'un organisme vivant est soumis à une dose élevée pendant un temps court, on observe une suite de symptômes dont la séquence et l'intensité dépendent de la dose reçue et est connu sous le nom de *syndrome d'irradiation aigu*. Ce syndrome ne survient que lorsque l'irradiation est aiguë et concerne le corps entier.

La première phase est appelée prodrome. A cette phase précoce, succède une seconde phase dite latente pendant laquelle on observe une régression ou une disparition des symptômes. Puis, dans une troisième phase, les signes cliniques réapparaissent. On distingue trois grands syndromes : hématopoïétique, gastro-intestinal et neuro-vasculaire.

En deçà d'une dose observée de 1 gray, il y a peu de signes cliniques chez la plupart des individus hormis parfois des signes neuro-végétatifs avec asthénie, céphalées, nausées.

Au-delà de 1 gray, apparaissent les premiers signes constituant la *phase prodromique*. Ils surviennent dans les 24 heures suivant l'exposition : les signes neuro-végétatifs comprennent des céphalées, une asthénie, une tachycardie, une hypotension et s'accompagnent de troubles digestifs à type de nausées, vomissements avec parfois douleurs abdominales et de troubles vasomoteurs. Le sujet atteint doit être systématiquement hospitalisé pour surveillance.

Au-delà de 2 grays, l'hospitalisation en service spécialisé est indispensable en raison de l'atteinte du *système hématopoïétique*.

- Les lymphocytes sont les cellules les plus radiosensibles ; leur nombre diminue rapidement après l'exposition, jusqu'au 3^{ème} - 5^{ème} jour, pour rester abaissés pendant plusieurs semaines.

- Le nombre de granulocytes peut augmenter le jour de l'exposition avant de diminuer les jours suivants.
- La lignée mégacaryocytaire est également radiosensible ; on observe une thrombopénie responsable de troubles hémorragiques.

En pratique, on constate donc une hyperleucocytose importante suivie d'une phase de latence de 3 semaines pendant laquelle s'installe l'aplasie médullaire. Période critique du fait des risques infectieux et hémorragiques, elle peut durer de 3 à 5 semaines et sera suivie d'une phase de récupération avec retour à la normale en plusieurs mois.

Au-delà de 6 grays, aux syndromes prodromique et hématopoïétique qui sont majeurs, s'ajoute le *syndrome gastro-intestinal* associant vomissements, diarrhée et hémorragie digestive. Les troubles intestinaux résultent de la destruction de la muqueuse intestinale. Les ulcérations muqueuses peuvent entraîner des perforations digestives. Les chances de survie dépendent de la dose reçue et du traitement administré. En l'absence de greffe de moelle osseuse, la mort est quasi certaine.

Le syndrome neuro-vasculaire apparaît pour des doses absorbées supérieures à 10 grays. Les signes neurologiques apparaissent pendant la phase prodromale, avec une sensation de chaleur suivie de nausées, vomissements, confusion et désorientation. La phase de latence est courte et dure 4 à 6 heures. Les symptômes nerveux réapparaissent avec une plus grande gravité associant tremblements, convulsions et conduisent au coma et à la mort. Aucune thérapeutique n'est efficace, le sujet meurt rapidement en 48 heures.

La destruction des endothéliums vasculaires est à l'origine d'une augmentation de la perméabilité capillaire entraînant une fuite des liquides dans l'espace extra-cellulaire. Il s'ensuit un œdème cérébral et un choc cardio-vasculaire.

Dans le cas de doses massives (30-50 Gy), les autres syndromes (hématopoïétique et gastro-intestinal) n'ont pas le temps de se développer.

4.1.2. Exposition externe partielle

Les effets pathologiques vont dépendre de la dose reçue et de l'organe concerné par l'irradiation.

4.1.2.1. Atteinte de la peau (104) (44)

Ce sont principalement les cellules souches basales qui vont être lésées par l'irradiation. Les cellules différenciées de la couche de Malpighi et de la couche cornée sont radiorésistantes. Une dose de 2 Gy tue environ 50 % des cellules souches basales.

Les différents types de pathologies que l'on peut rencontrer après exposition aux rayonnements ionisants sont les suivantes :

- ◆ Les radiodermites aiguës (ou précoces) apparaissent dans les jours ou semaines qui suivent l'exposition.

Elles sont devenues rares et sont d'origine accidentelle. On les classe cliniquement en trois stades :

- L'érythème du premier degré, précoce et transitoire, apparaît vers le 8^{ème} jour après une irradiation de l'ordre de 4 à 5 Gy. Il s'agit d'un érythème rosé, homogène, parfois accompagné d'œdème, analogue à un coup de soleil. La rougeur s'atténue au bout d'une semaine pour laisser place à une desquamation furfuracée, puis à une pigmentation passagère ou définitive. Peut également survenir une dépilation transitoire.
- La radioépidermite exsudative ou radiodermite du deuxième degré survient après une irradiation à des doses de l'ordre de 10 à 20 Gy. A partir du 10^{ème} - 12^{ème} jour, l'érythème précédemment décrit se complique de phlyctènes dont la rupture laisse à nu le derme. Ce dernier apparaît alors rosé ou rouge vif, finement grenu, avec présence d'une sérosité citrine ou recouvert d'une pellicule fibrineuse blanchâtre. Le malade présente une sensation de cuisson. La réparation commence sous forme d'un liseré périphérique progressant peu à peu vers le centre. La lésion se recouvre d'un nouvel épiderme lisse, blanc-bleuté, qui en quelques mois paraîtra semblable aux téguments voisins. Pour des doses supérieures à 10 Gy, la cicatrisation est lente avec apparition de zones pigmentées, parfois atrophiques et semées de télangiectasies et d'une dépilation définitive.
- La radionécrose aiguë ou radiodermite du troisième degré survient lors d'une irradiation de l'ordre de 25 Gy massive après une période de latence très courte de 1 à 8 jours. Apparaissent très rapidement des phlyctènes et des ulcérations douloureuses creusantes, parfois très profondes jusqu'aux plans osseux, difficiles à cicatrifier, pouvant évoluer d'emblée vers la radiodermite chronique. La cicatrisation est habituellement médiocre, fibreuse, adhérente, atrophique, toujours susceptible de s'ulcérer à nouveau et s'accompagnant d'une alopecie définitive.

Au-delà de 10 grays, des séquelles fonctionnelles à type de douleurs, de troubles de la sensibilité, de la vascularisation ou de la mobilité peuvent s'observer en plus des séquelles physiques cutanées.

- ◆ La radiodermite chronique (ou tardive) apparaît quelques mois, voire plusieurs dizaines d'années après l'irradiation. Elle est irréversible et est souvent de diagnostic difficile.

Elle est la conséquence d'irradiations répétées à petites doses ou d'une irradiation aiguë unique. Trois stades peuvent se succéder :

- La radiodystrophie cutanée associée à des degrés variables des télangiectasies parfois très importantes, des troubles de la pigmentation, une atrophie cutanée, une peau sèche, amincie avec disparition des glandes sébacées et sudoripares. Ce placard dystrophique réalise un état poïkilodermique caractéristique.
- La radiodermite scléro-atrophique correspond à une sclérose parfois très intense allant jusqu'au tissu sous-cutané avec rétraction et adhérence aux plans profonds musculaires et osseux sous-jacents, pouvant entraîner une compression vasculo-nerveuse et des douleurs rebelles.
- La radionécrose tardive apparaît en général sur un état dystrophique à la faveur d'un facteur déclenchant tel qu'un traumatisme. L'ulcération est d'évolution chronique et se rencontre plus fréquemment au niveau de certaines zones où les plans osseux et cartilagineux sont proches du tégument (cuir chevelu, oreilles, région sacrée...).

On peut également noter d'autres manifestations au niveau des doigts, à type de perte des empreintes digitales, striations longitudinales des ongles.

Le risque majeur des radiodermites chroniques est la cancérisation. Celle-ci est à craindre autant pour les radiodermites secondaires à une irradiation accidentelle que celles provoquées par des irradiations répétées à petites doses.

◆ Les radiocancers cutanés

L'irradiation peut induire principalement deux types de cancers au niveau de la peau : les épithéliomas basocellulaires et les épithéliomas spinocellulaires. Le délai d'apparition du cancer peut être très long après l'irradiation ; il peut dépasser une vingtaine d'années. Le risque de cancer est très diversement apprécié car on trouve une incidence de 3,6 à 57 % mais toute ulcération sur radiodermite doit toujours faire évoquer l'hypothèse d'une transformation néoplasique. Les irradiations à faibles doses sont plutôt responsables de carcinomes basocellulaires, alors que les irradiations à forte dose sont en règle générale responsables de carcinomes spino-cellulaires (104).

4.1.2.2. Effets sur les gonades (113)

◆ Les testicules

La stérilité chez l'homme est affectée par des doses relativement faibles, les cellules germinales étant très radiosensibles. Une dose de 0,08 Gy entraîne une diminution temporaire du nombre de spermatozoïdes et une dose de 0,2 Gy provoque une diminution notable du nombre de spermatozoïdes pendant plusieurs mois. Une dose de 0,5 Gy réduit le nombre de spermatozoïdes à moins de 2 %. Après 2 Gy, on observe une azoospermie durable de 1 à 2 ans. Après 6 Gy, l'azoospermie est généralement définitive; On a cependant observé des régénérations après des délais aussi longs que 10 à 14 ans.

En revanche, les capacités et les caractères sexuels sont peu touchés même après des doses de plusieurs dizaines de Gy ; les sécrétions hormonales sont préservées du fait de la résistance des cellules de Sertoli testiculaires ainsi que des cellules de Leydig. Lors des traitements radiothérapeutiques, on a pu observer que des doses de 3 à 10 Gy délivrées avant la puberté, entraînaient une élévation de la FSH qui se manifeste après la puberté.

Le risque génétique après irradiation aiguë :

Chez l'homme, pendant les 6 premières semaines après l'irradiation, le nombre de spermatozoïdes et par conséquent la fertilité sont inchangés. Cependant, en cas de fécondation, la probabilité d'anomalies génétiques est multipliée par deux par rapport à une fécondation ultérieure.

Entre la 6^{ème} et la 9^{ème} semaine, on observe la baisse rapide du nombre de spermatozoïdes. Après la 10^{ème} semaine, les spermatozoïdes proviennent des cellules souches survivantes dont la prolifération a été stimulée par le dépeuplement du compartiment spermatogonie. C'est pourquoi, on conseille d'attendre au moins trois mois après l'irradiation pour procréer afin de diminuer le risque d'anomalie génétique.

◆ Les ovaires

Les ovocytes sont très radiosensibles ; une dose de 0,1 Gy en tue environ la moitié. En cas d'irradiation, les follicules en voie de maturation et les follicules mûrs sont également lésés : la stérilisation est donc immédiate. Les doses d'irradiation qui provoquent une stérilité varient avec l'âge ; elles passent de 12 à 15 Gy chez une femme de 20 ans, à 5-7 Gy à 45 ans. Du fait de l'origine commune des sécrétions hormonales et des gamètes, l'irradiation entraîne également une atteinte des caractères sexuels avec ménopause précoce. Une dose de quelques Gy provoque une stérilité temporaire et un déséquilibre hormonal transitoire. Chez les fillettes irradiées pour des cancers, un taux élevé de gonadotrophines (FSH et LH) est observé quand l'ovaire a reçu une dose de 20 à 30 Gy en un mois, ce qui témoigne d'une lésion irréversible de l'ovaire.

Risque génétique après irradiation aiguë : les ovocytes sont remarquablement peu sensibles à l'induction d'anomalies génétiques. Pour des doses relativement élevées pour stériliser un grand nombre de follicules, les conséquences de l'irradiation du point de vue génétique sont beaucoup moins graves qu'après irradiation du testicule.

4.1.2.3. Effets sur l'œil

La partie la plus radiosensible de l'œil est le cristallin. Le seuil d'apparition des opacités du cristallin, généralement sans conséquences visuelles, est de 1 à 2 Gy en exposition unique et brève, alors qu'une dose unique de 5 Gy est nécessaire pour déclencher une cataracte. Si l'exposition est fractionnée, le seuil s'élève pour les opacités isolées à 5 Gy et pour la cataracte à 10 Gy. En exposition chronique, le seuil d'apparition des opacités cristalliniennes est supérieur à 0,15 Gy par an, dose maximale admissible pour les travailleurs exposés (32).

On peut également observer une kératite sèche due à la destruction des glandes lacrymales adjacentes (11), une blépharite et une conjonctivite.

4.1.2.4. Effets sur la thyroïde

Les glandes endocrines sont en général assez résistantes, sauf la thyroïde pour laquelle les effets peuvent être retardés de 10 à 15 ans avec apparition d'une hypothyroïdie.

Après irradiation directe de plus de 30 Gy, peut apparaître une hypothyroïdie. Le risque d'hyperthyroïdie, d'une thyroïdite subaiguë ou d'une maladie de Hashimoto est également augmenté (87).

4.1.2.5. Effets sur le système hématopoïétique

Une irradiation par des faibles doses étalées dans le temps peut entraîner des modifications de la numération formule sanguine. Une dose quotidienne de 2 mGy peut provoquer une thrombopénie. Une dose de 10 mGy par semaine peut entraîner une leucopénie avec inversion de la formule leucocytaire. On peut également voir apparaître une anémie macrocytaire, une réticulocytose, une hyperleucocytose et une polyglobulie (54) (44).

4.1.2.6. Autres effets viscéraux (32)

◆ Système nerveux

En ce qui concerne l'encéphale : les lésions cérébrales secondaires à une irradiation fractionnée thérapeutique sont d'apparition tardive de l'ordre de 1 à 3 ans. Elles consistent essentiellement en une leucoencéphalopathie diffuse dans le territoire irradié. Des lésions de radionécrose peuvent également se voir.

Pour la moelle épinière, des myélopathies radiques aiguës peuvent survenir environ trois mois après l'irradiation pour des doses supérieures à 45 Gy en fractionnement classique. Elles se manifestent le plus souvent par des signes sensitifs traduisant une atteinte cordonale postérieure et sont généralement réversibles. En revanche, une myélite transverse tardive, survenant plus de 6 mois et jusqu'à plusieurs années après l'irradiation, est une complication irréversible redoutable. Elle se traduit par un syndrome de section ou d'hémisection médullaire (Brown-Sequard).

◆ Intestin

A la phase chronique d'une irradiation aiguë ou après une irradiation fractionnée, on observe une atrophie relative de l'épithélium intestinal, une fibrose sous muqueuse avec épaississement pariétal diminuant la lumière, une rigidité des anses et une raréfaction vasculaire intestinale et mésentérique. L'ensemble constituant le « grêle radique » se manifeste cliniquement par des douleurs, des troubles du transit avec épisodes sub-occlusifs, un syndrome de malabsorption, et parfois des complications à type d'occlusion, de perforations ou de fistules.

◆ Poumon

La pneumopathie aiguë radique apparaît au-dessus de 8 Gy en dose unique. Elle se manifeste par un syndrome de détresse respiratoire aiguë avec « poumon blanc ». En irradiation fractionnée, ces pneumopathies apparaissent environ trois mois après l'irradiation et se traduisent par des condensations plus ou moins systématisées, parfois asymptomatiques mais induisant le plus souvent un tableau de pneumonie. Ces pneumopathies évoluent vers la fibrose pulmonaire aggravée par des lésions capillaires associées, avec syndrome restrictif aboutissant à l'insuffisance respiratoire.

◆ Os et cartilage

L'irradiation des os en période de croissance détruit les chondroblastes des cartilages fertiles et entraîne un retard, voire un arrêt de croissance. En fractionnement conventionnel de radiothérapie, l'arrêt de croissance peut survenir à partir de 20 Gy. Chez l'adulte, les ostéoradionécroses peuvent survenir dans les champs d'irradiation d'affections malignes à partir des doses de 60 Gy en fractionnement conventionnel.

4.2. Effets stochastiques ou aléatoires

Ils ne concernent que certains individus, apparemment au hasard, d'où leur nom d'effets aléatoires. Ce hasard n'est peut être qu'apparent, car il existe sans doute des individus plus sensibles que d'autres dans une population donnée.

Ils sont indépendants de la dose reçue. La probabilité d'apparition dans une population exposée augmente avec la dose efficace reçue. La gravité des effets stochastiques est indépendante de la dose qui les a provoqués. On admet qu'il n'y a pas de dose seuil, étant donné notre incapacité à démontrer un effet aux faibles doses.

Lorsqu'ils surviennent, ils sont toujours graves.

Ces effets sont tardifs et n'apparaissent qu'après un temps de latence très variable pouvant aller de quelques années (deux à quinze pour les leucémies) à quelques dizaines d'années (jusqu'à 40 ans) pour les cancers solides. Ce long temps de latence ne facilite pas les études. Ces effets sont non spécifiques, c'est-à-dire qu'ils ne se distinguent en rien des affections de même nature qui apparaissent spontanément.

Ils vont atteindre soit le sujet avec un effet cancérigène, soit sa descendance avec un effet génétique (80) (1).

Caractéristiques générales des effets déterministes et aléatoires :

	Effets déterministes	Effets aléatoires ou stochastiques
Phénomènes aléatoires	non	oui
Doses	élevées	faibles
Dose-seuil	oui	non
Délai	court	long
Gravité	± gravité croît avec la dose	+ gravité indépendante de la dose (effet de tout ou rien)
Spécificité	oui	non
Réversibilité	oui	non
Pathologies	La plupart des effets sont précoces : - peau - gonades - moelle osseuse - intestin D'autres sont tardifs : - cataracte - lésions de sclérose et de nécrose	- Cancers - Effets génétiques

4.2.1. Effets cancérogènes des radiations

L'effet cancérogène des rayonnements ionisants est connu depuis l'observation, au début du XX^{ème} siècle, de cancers cutanés et de leucémies en excès chez les premiers radiologues. Pour les étudier, on dispose de trois sources d'information : l'expérimentation animale, les études in vitro et les résultats des différentes études épidémiologiques effectuées chez l'homme.

4.2.1.1. Etudes expérimentales (70)

Des cancers ont été induits par irradiation chez l'animal dès 1910, et en 1966 on démontrait qu'une irradiation de culture tissulaire pouvait transformer une cellule normale en cellule cancéreuse.

Les mécanismes de la radiocancérogénèse ont été étudiés sur des cultures cellulaires. Ils sont particulièrement complexes et restent incomplètement connus. Il n'est pas possible de distinguer pour les rayonnements ionisants un processus de cancérisation distinct de celui d'autres cancérogènes. Le cancer est le résultat de plusieurs modification d'une même cellule.

Les rayonnements ionisants peuvent intervenir aux deux principaux stades :

- l'initiation où surviennent des modifications irréversibles du matériel génétique cellulaire (mutation ou modification de l'expression d'un ou plusieurs gènes);
- la promotion, où parallèlement à une prolifération active de la cellule initiée, peuvent survenir de nouvelles lésions de l'ADN ; il est probable que se succèdent à ce stade plusieurs étapes indépendantes.

Les facteurs radiobiologiques qui interviennent dans la cancérogénèse sont comparables tant dans les études in vivo chez l'animal que dans la transformation cellulaire in vitro :

- la dose : les coefficients de risque sont réduits d'un facteur compris entre 2 et 10 quand on passe des doses élevées aux faibles doses de rayons X ou gamma (113). L'existence d'une diminution du risque par unité de dose, à mesure que la dose décroît, provient de l'existence de phénomènes de réparation dont l'efficacité a été largement démontrée chez les mammifères.

La forme de la courbe dose-effet varie avec le type de cancer. Le plus souvent, pour les rayons X, elle correspond à une relation linéaire quadratique avec des effets faibles pour les dose inférieures à 1 Gy. Aux fortes doses, la courbe décroît de façon exponentielle (probablement en raison d'un phénomène de mort cellulaire). Cependant d'autres formes de courbes peuvent s'observer : relation linéaire, relation quadratique, existence d'un seuil.

- Le débit de dose : à dose égale, le risque de cancer est 2 à 10 fois plus faible pour des irradiations à faible débit de dose, par comparaison à un fort débit de dose. En général, le fractionnement de la dose réduit également le risque de cancer.
- Le type de rayonnement : les rayonnements à transfert d'énergie élevé (particules alpha et neutrons) sont, à dose égale, cinq à vingt fois plus cancérogènes que les rayons X, gamma ou les électrons.

Le risque de cancer est variable selon les espèces, les races animales et les tissus étudiés.

Les études expérimentales ont permis le développement des connaissances sur la radiocancérogénèse, mais l'extrapolation à l'espèce humaine reste difficile. C'est pourquoi l'estimation quantitative des risques repose essentiellement sur les enquêtes épidémiologiques chez l'homme.

4.2.1.2. Etudes épidémiologiques

Les études épidémiologiques, très nombreuses, dérivent de trois sources principales : les explosions nucléaires à Hiroshima et Nagasaki, les irradiations médicales (radiodiagnostic et radiothérapie) et les expositions professionnelles.

Leur interprétation reste difficile car la mortalité naturelle par cancer reste élevée, environ 25% des causes de décès en France et les cancers radio-induits qui ne se différencient en rien des autres cancers sont rares : 1 à 2 % des cancers seulement sont dus aux rayonnements ionisants (21).

◆ Etudes du bombardement de Hiroshima et Nagasaki de 1945 :

Une étude de cohorte (84) réalisée sur 86000 survivants est essentiellement composée de patients faiblement exposés de l'ordre de 0,3 Gy. Sur 52235 sujets, un excès de 341 cancers et 86 leucémies est observé ; 49 % des leucémies sont attribuables aux rayonnements contre 7 % des cancers solides.

Les leucémies sont apparues en excès 3 à 5 ans après l'événement. L'excès de cancer solide n'est perceptible que 5 à 10 ans après le bombardement.

Aucun excès n'a pu être mis en évidence pour des doses inférieures à 200 mSv pour les leucémies et 200-500 mSv pour les cancers solides. Chez les enfants, un effet cancérigène est observé pour des doses aussi faibles que 100 mSv pour la thyroïde et le sein, mais ces résultats ne peuvent être rapportés chez l'adulte.

Concernant les cancers solides, on a retrouvé essentiellement des cancers de l'œsophage, de l'estomac, du colon, du poumon, du sein, le myélome multiple...

Une étude a été réalisée par Pierce et al (35) avec un suivi complémentaire de 10000 survivants sur 5 années supplémentaires entraînant donc une augmentation de la puissance statistique. Celle-ci met en évidence une augmentation de 25 % de décès pour les tumeurs solides et un excès en diminution pour les leucémies sur les 5 dernières années. Ils ont également conclu que pour les tumeurs solides, le niveau le plus faible au-dessus duquel une relation significative entre dose et effet peut être observé est de 50 mSv. Mais ces résultats sont discutés par certains auteurs (109).

Les controverses de ces études sont basées sur l'incertitude quant à l'estimation des doses, en particulier la dose neutron, mais celles-ci ne devraient pas modifier l'estimation du risque de manière importante ainsi que l'irradiation à fort débit de dose (la majorité de la dose a été reçue de manière quasi instantanée lors de l'explosion) (29).

◆ Etudes sur les travailleurs de l'industrie nucléaire :

Il s'agit d'expositions chroniques à faible dose aux rayonnements ionisants. Ces études sont donc intéressantes pour l'estimation du risque lié aux faibles doses et débits de doses de rayons. Les études publiées portent sur des cohortes de travailleurs américains, anglais, canadiens et plus récemment japonais et espagnols. Prises individuellement, celles-ci ne montrent pas d'augmentation du risque lié aux rayonnements mais la puissance statistique de ces études est faible et les intervalles de confiance sont larges.

Des estimations directes des effets cancérigènes des faibles doses de rayonnements reçus de manière prolongée ont été réalisées dans le cadre des analyses combinées des données sur 96000 travailleurs du Canada, du Royaume-Uni et des USA (29). 2000 personnes avaient reçu une dose supérieure à 400 mSv. L'enquête a montré une légère augmentation des leucémies pour des doses supérieures à 400 mSv où 6 décès par leucémies ont été enregistrés, pour 2,3 attendus. Cependant, elle ne met pas en évidence d'augmentation de tumeurs solides chez les travailleurs (109).

◆ Etudes médicales :

- Cancers radio-induits liés au radiodiagnostic :

Les doses délivrées en radiodiagnostic sont en général très faibles, ce qui explique que les données soient à peu près inexistantes. Cependant Boice et al. ont montré une augmentation significative du taux de cancer du sein chez les femmes ayant eu des radioscopies répétées pour le traitement de la tuberculose, mais les doses étaient relativement importantes. Il en est de même pour le Thorotrast (oxyde de thorium) largement utilisé comme produit de contraste jusqu'aux années 50 : il était responsable d'une augmentation du nombre de leucémies ainsi que de cancers du foie et des voies biliaires (35).

- Cancers radio-induits liés à la radiothérapie :

Un suivi régulier (106) a été réalisé sur 14000 sujets irradiés au niveau du rachis pour une spondylarthrite ankylosante entre 1934 et 1954. Les sujets ayant reçu une dose à la moelle osseuse de 2 à 6 Gy ont un risque de leucémie multiplié par 5 par rapport aux sujets non irradiés, avec une latence de 3 à 5 ans.

Concernant la maladie de Hodgkin, nous disposons de cohortes de plusieurs milliers de personnes avec un recul de 15 à 20 ans ; les études mettent en évidence une augmentation de leucémies et plus tardivement de cancers solides (35).

Une enquête (61) a été réalisée par le Centre International de Recherche sur le Cancer de Lyon chez les femmes traitées par radiothérapie pour un cancer du col de l'utérus. Celle-ci portait sur 83000 patientes suivies pendant 25 à 30 ans et a mis en évidence une augmentation faible mais significative de la fréquence des leucémies et des cancers secondaires par rapport à une population témoin.

◆ L'accident de Tchernobyl survenu en avril 1986 :

Des études (29) sont en cours en particulier sur les liquidateurs (600000 à 800000 personnes ayant participé à la décontamination de la zone industrielle et des zones irradiées). Parmi eux, 200000 personnes ont reçu une dose moyenne de 100 mSv. Des augmentations d'incidence de leucémie ont été rapportées chez les liquidateurs par plusieurs auteurs de Russie, Belarus et

Ukraine mais ces premiers résultats sont à prendre avec prudence du fait des incertitudes sur les mesures de dosimétrie des liquidateurs. Actuellement des études cas-témoins sont en cours et permettront une meilleure estimation des conséquences.

Il existe par ailleurs une augmentation incontestable de cancers thyroïdiens chez l'enfant où l'excès de risque absolu serait de 4 pour 10000 Sv par an. Concernant les tumeurs solides, bien qu'il ne soit pas noté ce jour d'augmentation significative, on ne dispose par de recul suffisant pour permettre des conclusions définitives (35).

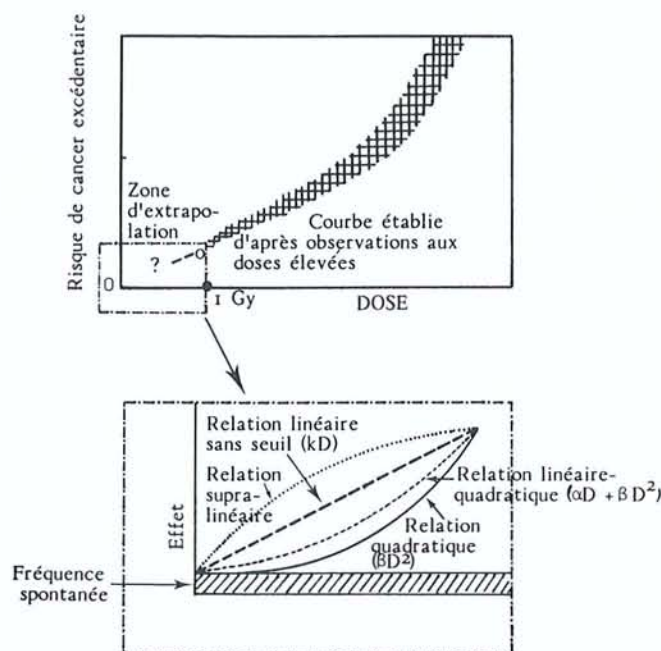
De plus, les études cas-témoins (84) mettent en évidence les facteurs influençant l'effet des rayonnements ionisants ; elles révèlent l'effet de l'âge à l'exposition avec une sensibilité augmentée chez les enfants, le sexe et le temps écoulé depuis l'exposition. Des études suggèrent l'existence de groupes particulièrement sensibles, génétiquement prédisposés à la radiocancérogénèse. En ce qui concerne le cancer du poumon, le tabagisme apparaît comme un facteur se combinant de manière plus qu'additive aux irradiations.

4.2.1.3. *Evaluation des risques aux faibles doses*

Toutes ces études concordent pour reconnaître le risque d'augmentation de l'incidence des cancers pour les fortes doses (supérieures à 500 mSv). Le problème qui demeure concerne l'effet des faibles doses. Les études réalisées n'ont pas mis en évidence d'augmentation de leur incidence pour des doses inférieures à 200 mSv chez l'adulte et 100 mSv chez l'enfant (1). Les leucémies sont, à faible dose, les cancers les plus inductibles par les radiations. L'augmentation de leur fréquence n'est établie que pour des doses supérieures à 200 mSv en irradiation à débit élevé et 400 mSv à débit faible (109). Selon l'étude de Pierce, on pourrait identifier une augmentation significative de risque de tumeurs solides pour des doses de 50 mSv, mais ces résultats sont contestés. En dessous de ces doses, les données épidémiologiques n'ont pas permis de détecter d'augmentation de tumeurs soit parce qu'il n'y a rien à détecter, soit parce que le risque est si faible qu'il en devient indiscernable par rapport au risque (élevé) de cancers spontanés.

Pour évaluer le risque d'induction de cancers aux faibles doses, on est amené à effectuer des extrapolations à partir des observations recueillies pour des doses élevées. Selon les données expérimentales et épidémiologiques, cette extrapolation peut se faire selon différentes hypothèses (61) (111) :

- Relation supra-linéaire : cette relation exceptionnellement mise en évidence dans des populations animales hétérogènes et non démontrée chez l'homme n'a pas été retenue.
- Relation linéaire sans seuil où la probabilité de survenue de l'effet est proportionnelle à la dose, même pour les faibles doses. Le CIPR (Commission Internationale de Protection radiologique) a choisi la relation linéaire par prudence.
- Relation linéaire quadratique : elle implique que le risque est faible aux faibles doses, puis croît avec la dose de telle manière que le risque, par unité de dose, est d'autant plus élevé que la dose est plus élevée. Elle est la plus plausible scientifiquement chez l'homme.
- Relation quadratique.



Extrapolation de la relation dose-effet vers les faibles doses
 Source : TUBIANA M. Radiobiologie (111)

D'après les données scientifiques actuellement disponibles, la relation linéaire quadratique est la plus plausible pour les doses inférieures à 0,5 Gy. Mais, la relation paraît différente selon le type de cancer. Selon les données d'Hiroshima et de Nagasaki, la relation serait linéaire quadratique ou quadratique pour les leucémies et plutôt linéaire pour les tumeurs solides (38). Des études (109) ont été effectuées sur les ostéosarcomes après contamination par des radioéléments émetteurs alpha et sur les cancers du foie après injection de Thorotrast. Les courbes ne sont pas compatibles avec une relation linéaire sans seuil et sont en faveur soit d'une relation quadratique soit d'un seuil pratique.

Le CIPR se base sur l'extrapolation linéaire sans seuil assortie à un facteur de réduction de 2 (facteur de réduction de 2 à 10 d'après les études expérimentales lors du passage des fortes doses aux faibles doses) par mesure de précaution pour les irradiations aux faibles doses.

Certains auteurs ne sont pas en accord avec les conclusions du CIPR. Tubiana (109) propose de considérer :

- comme négligeable les doses inférieures à 10 mSv selon les données actuelles,
- pour des doses supérieures, admettre par prudence une relation linéaire sans seuil (mais en tenant compte de la pente de la droite et des intervalles de confiance) avec un facteur de réduction de 5 qui paraîtrait mieux en accord avec les données expérimentales.

Devant ces données insuffisantes, les études épidémiologiques en cours (notamment sur les travailleurs de l'industrie nucléaire et sur les liquidateurs de Tchernobyl) seront importantes pour l'évaluation du risque lié aux faibles doses reçues de manière prolongée dans les années à venir.

4.2.1.4. Extrapolation des données observées à la vie entière

En raison de la très longue période de latence des cancers radio-induits, tous les cancers en excès n'ont pas encore été observés dans les populations étudiées. C'est pourquoi, on utilise des modèles mathématiques de façon à évaluer sur une population donnée le risque de cancer sur la vie entière. On distingue principalement deux modèles (70) :

- modèle de risque absolu (ou modèle additif) où l'on considère que le risque excédentaire reste constant et indépendant de l'incidence spontanée du cancer considéré.
- modèle de risque relatif (ou risque multiplicatif) où la proportion de cancers en excès est constante.

Le CIPR a choisi le modèle de risque relatif selon les données d'Hiroshima et de Nagasaki mais surtout par mesure de prudence.

Mais ce modèle mathématique est remis en question par différents auteurs car selon les cancers, c'est tantôt le modèle de risque relatif, tantôt le modèle de risque absolu qui donne le moins mauvais ajustement. De plus, pour les leucémies et certains types de cancers, le risque après être passé par un maximum revient après une dizaine d'années à une valeur proche de la normale. Il apparaît plausible que le risque cancérigène ait été surestimé d'un facteur de 2 (109) et ces résultats mériteraient d'être reconsidérés selon Tubiana (108).

Le CIPR calcule un facteur de risque de survenue de cancer associé aux rayonnements ; le coefficient retenu actuellement est de 0,04 cancer par Sv soit 400 cancers pour 10000 personnes. Cette limite semble la limite supérieure de l'effet carcinogène potentiel des rayonnements ionisants (106).

4.2.1.5. Les différents types de cancers observés

Les principaux cancers rencontrés dans le milieu professionnel sont principalement les cancers cutanés, les leucémies, les cancers pulmonaires et les ostéosarcomes. Nous détaillerons les observations cliniques des cancers cutanés, des leucémies et des cancers pulmonaires dans le chapitre 7.

Concernant les ostéosarcomes, une enquête a été réalisée en 1920 sur des personnes peignant des cadrans et des chiffres d'horloges des peintures luminescentes contenant du Radium 226, émetteur alpha. Les femmes s'étaient contaminées assez lourdement, puisque la dose moyenne reçue par leur squelette a été évaluée à 17 Gy. Sur 1907 femmes peintres, 63 ont présenté un ostéosarcome, un carcinome de la mastoïde ou des sinus, alors que la fréquence attendue de ces cancers était inférieure à 1. Ces ouvrières suçaient leur pinceaux et absorbaient ainsi des quantités importantes de Radium qui se fixe électivement sur le squelette.

Chez ces sujets comme chez ceux ayant autrefois reçus du Radium par voie intra-veineuse dans un but thérapeutique, aucun cancer n'a été observé pour des doses faibles inférieures à 1000 mSv mais la fréquence des cancers augmente rapidement à partir de quelques Gy ce qui suggère l'existence d'un seuil pratique (111).

Les cancers différenciés de la thyroïde sont rares et représentent 1% des cancers. L'âge médian au moment du diagnostic est de 45 - 50 ans et sont plus fréquents chez la femme. On retrouve le plus souvent des tumeurs papillaires. L'incidence des tumeurs de la thyroïde augmente 5 à 10 ans après l'irradiation et est maximum entre 15 et 20 ans. On a observé leur augmentation chez des enfants pour des doses d'irradiation de 100 mSv. La relation dose-effet est de type linéaire (60).

Les cancers thyroïdiens ont été mis en évidence à la suite de l'accident de Tchernobyl. En effet, on a observé leur augmentation chez les enfants vivants dans les territoires contaminés par l'accident avec une incidence multipliée par 75. Ceci montre la radiosensibilité de la thyroïde à un très jeune âge ; mais il existe des facteurs favorisants (4). On a également noté une augmentation de ces cancers chez l'adulte avec une incidence multipliée par 3.

Chez les rescapés d'Hiroshima, on a observé 10 à 20 ans après l'explosion une augmentation considérable des cancers thyroïdiens.

On a noté une recrudescence de ces tumeurs chez les habitants des Iles Marshall à la suite d'un accident nucléaire (54).

Plusieurs études (60) ont suggéré l'existence d'une relation entre l'irradiation professionnelle et la survenue de cancers de la thyroïde. Le suivi des travailleurs chinois exposés aux rayons X a montré un excès de ces tumeurs chez les plus jeunes. La dose estimée était probablement supérieure à 1 Gy. Dans des études suédoises, l'irradiation pour raisons professionnelles est associée à un risque augmenté de cancers de la thyroïde chez les manipulateurs de radiologie et les techniciens de laboratoire, chez les dentistes et les assistants dentaires. Toutefois, le nombre de cancers observés est faible et l'existence de biais est possible.

Concernant les cancers du sein, des études ont été effectuées chez le personnel navigant et mettent en évidence quelques signes d'alerte bien que les biais envisageables soient nombreux (65). Chez les techniciennes de radiologie, on n'a pas retrouvé d'augmentation de cancer du sein mais les doses d'irradiation étaient inférieures à 10 mSv (20). La fréquence de cancers du sein est augmentée après radiothérapie à fortes doses.

Des cholangiomes et des hématosarcomes ont été découverts chez des sujets qui avaient subi des examens radiologiques utilisant un produit de contraste radioactif et radio-opaque : le Thorotrast.

Les types de cancers pouvant se rencontrer après radiothérapie à de fortes doses sont principalement les cancers du sein, cancers digestifs, tumeurs des glandes salivaires, de la plèvre et de la sphère génitale chez la femme.

4.2.2. Effets génétiques (15)

Comme les cancers, ce sont des effets aléatoires, non spécifiques des radiations ionisantes, et qui sont différés dans le temps. Ils sont provoqués par la mutation d'une cellule de la reproduction qui a été démontrée par Muller dès 1928. Ils sont difficile à mettre en évidence car l'incidence naturelle des anomalies génétiques est importante.

Les anomalies génétiques peuvent concerner soit les chromosomes avec modification de leur nombre ou de leur structure (pouvant être dépistées par l'étude du caryotype), soit un ou plusieurs gènes sans qu'il y ait modification de la structure du chromosome. On distingue trois types d'anomalies génétiques :

- Les mutations autosomiques dominantes ou liées au sexe. Elles apparaissent à la première génération, puisqu'elles sont dominantes, dès que l'un des chromosomes parentaux est porteur de l'anomalie. Elles peuvent concerner tous les chromosomes, aussi bien la paire de chromosomes sexuels que les 22 paires de chromosomes autosomiques.
- Les mutations récessives. Elles se manifestent si le hasard des croisements fait que les deux parents sont porteurs de la même mutation. Les conséquences apparaîtront après plusieurs générations. Leur chance de se manifester sont faibles (si le gène récessif est présent avec une fréquence de 10^{-4} , les risques de se manifester effectivement dans une population seront de $10^{-4} \times 10^{-4}$, soit 10^{-8} à chaque génération, car il faut que les deux parents soient porteurs de l'anomalie).
- Les mutations à transmission irrégulière. Elles sont beaucoup plus difficile à définir et à identifier que les précédentes. Elles interviennent dans l'apparition des maladies à causes multiples (hypertension...). Ce sont des étiologies pour lesquelles jouent plusieurs facteurs : hérédité, environnement, comportement et habitudes acquises... Elles joueraient un rôle majeur dans l'incidence naturelle des anomalies génétiques.

Les données sur ces effets génétiques proviennent à la fois des études chez l'animal et des enquêtes épidémiologiques chez l'homme.

Les études animales ont été effectuées sur plusieurs générations successives de souris qui ont été irradiées. Après 45 générations, on a observé une légère baisse d'infertilité qui a disparu après 100 générations ; aucun effet génétique n'a pu être mis en évidence.

Concernant les enquêtes épidémiologiques :

- La seule enquête humaine importante dont nous disposons, est l'étude des survivants d'Hiroshima et de Nagasaki. Elle ne montre aucune différence statistiquement significative lorsque nous comparons 30000 sujets dont un parent au moins a été irradié et 40000 témoins.
- Les enquêtes faites parmi les patients traités par radiothérapie avec des doses élevées (maladie de Hodgkin, cancer testiculaire) au niveau des gonades, et qui ont eu des enfants ne permettent pas non plus de faire apparaître une augmentation des anomalies génétiques, mais les effectifs sont relativement modestes.
- Les études effectuées au niveau de la descendance des radiologues qui ont été très exposés au début du siècle n'ont pas mis en évidence d'augmentation significative des anomalies génétiques.
- Une étude chinoise très intéressante compare deux populations de plusieurs dizaines de milliers de personnes, exposées à des irradiations naturelles très différentes. Leurs ascendants ont vécu à plus de 90 % dans les mêmes lieux depuis près de six générations. Bien que les doses cumulées en six générations, et dues à l'irradiation naturelle, diffèrent de plusieurs dizaines de sievert, cette étude ne montre aucune différence de fréquence pour 31 maladies héréditaires.
- Cela, permet de conclure que si les effets existent pour des doses modérées (quelques dixièmes ou quelques centièmes de sievert), ils sont trop modestes pour qu'on puisse les

mettre en évidence, d'autant plus que d'autres facteurs liés à l'environnement et au mode de vie peuvent interférer.

4.3. Effets tératogènes

L'embryon et le fœtus humains sont sensibles à l'irradiation. Comme pour de nombreux agents toxiques, physiques ou chimiques, cette sensibilité connaît des variations qualitatives et quantitatives en fonction du stade du développement (1). Les deux principaux effets des rayonnements ionisants sur la grossesse sont le risque malformatif et l'induction de cancer à long terme.

Avant l'implantation (9^{ème} jour dans l'espèce humaine), l'œuf est au stade de morula. Chacune des cellules qui le constitue est capable de produire un embryon normal. Si une ou plusieurs d'entre elles sont tuées, la multiplication des autres permet de compenser. L'effet d'une irradiation obéit donc à la loi du tout ou rien : si toutes les cellules sont lésées, la grossesse s'arrête et n'est même pas décelée (pas de retard de règles). Si les lésions ne portent que sur une partie des cellules, la grossesse se poursuit normalement (33).

Les données humaines concernant l'effet létal sont peu nombreuses : les irradiations effectuées en radiothérapie chez les femmes enceintes indiquent qu'une dose de 3,5 Gy à 4 Gy est susceptible de provoquer une fausse couche. Ces observations cliniques sont corroborées par les données d'Hiroshima et de Nagasaki, qui mettent en évidence une mortalité intra-utérine élevée (de l'ordre de 40 %) chez les femmes qui ont été exposées à des doses très fortes, de l'ordre de 3,5 Gy. En revanche dans le groupe de femmes enceintes irradiées à des doses plus faibles, aucun excès de la mortalité intra-utérine n'a été trouvé (70).

Après l'implantation, se situe la **période d'embryogenèse** (du 9^{ème} jour au début de la 9^{ème} semaine post-conception) durant laquelle se mettent en place les ébauches des différents tissus et organes. C'est pendant cette période que la radiosensibilité est la plus forte, particulièrement entre la 3^{ème} et la 5^{ème} semaine post-conception. Les cellules sont différenciées et se divisent rapidement. La mort d'un groupe de cellules peut occasionner à ce stade l'arrêt de développement partiel ou total d'un organe ou d'un membre, engendrant une malformation majeure.

Les malformations touchent en particulier l'œil et à un degrés moindre le squelette, les autres malformations étant rares (43).

Il s'agit d'un risque déterministe qui n'apparaît qu'au-dessus d'un seuil que la plupart des auteurs situent aux environs de 200 mGy (33).

Au cours de la maturation fœtale (de la 9^{ème} semaine au 9^{ème} mois), en général les organes sont formés et la mort d'un groupe de cellules ne peut plus causer qu'une malformation mineure ou partielle d'un organe. Une exception importante, le cerveau qui connaît jusqu'à la 15^{ème} semaine une phase de développement cruciale, celle de la migration neuronale.

De nombreux facteurs extrinsèques, dont l'exposition aux rayonnements ionisants, comportent à ce stade un risque de développement cérébral insuffisant, se traduisant par un retard mental associé ou non à une diminution du périmètre crânien. Ce risque au niveau du

développement cérébral a un seuil de 500 mGy. On estime cependant que les diminutions du QI peuvent apparaître au-dessus de 200 mGy. Il faut savoir que l'incidence spontanée de malformations est élevée (3 % des grossesses) et que le retard mental associé ou non à un syndrome malformatif a la même incidence de 3 % (33).

Pendant cette même période, des troubles de la croissance avec déficits staturo-pondéraux, retards d'ossification ont été décrits après des irradiations in utéro à des doses élevées supérieures à 1 Gy.

En revanche, on n'a pas pu mettre en évidence de relation dépendant de la dose pour deux incidences caractérisant la fertilité, à savoir la fréquence et le nombre de naissances par couple.

Enfin, de nombreuses études (70) portant sur le suivi des enfants dont les parents ont été irradiés et de leurs descendances, études basées sur des examens cliniques répétés, n'ont révélé aucun effet génétique significatif.

Durant la phase fœtale tardive, une irradiation peut comporter des risques cancérogènes, qui se révéleront après la naissance. En fait, les risques cancérogènes semblent constants au cours de la phase fœtale avec une prédominance au cours du troisième trimestre (43). Les effets cancérogènes sont de type stochastiques et n'ont donc pas d'effet seuil. L'incidence spontanée de cancers (et de leucémies) de l'enfant de 0 à 15 ans est de 2 à 3 pour mille.

Les expérimentations animales suggèrent que l'âge, au moment de l'irradiation, est déterminant vis à vis de la cancérogenèse radio-induite et que la période fœtale tardive semble constituer le moment de la plus forte sensibilité.

Concernant les données humaines (70) (33). :

- Les études effectuées sur les populations d'Hiroshima et Nagasaki n'ont pas observé d'augmentation significative des affections cancéreuses chez les enfants dont les mères ont été exposées au rayonnement initial de l'explosion.
- Dans d'autres études, en revanche, une augmentation statistique du nombre de cancers et notamment de leucémies de l'enfance a été constatée après des irradiations supérieures à 200 mGy.
- Les études les plus récentes extrapolant à partir des fortes doses, estiment l'augmentation du risque à environ 0,05 % pour 10 mGy reçus in utéro. Si l'on se réfère au risque spontané de 0,25 %, une dose de 10 mGy reçue in utéro ferait donc passer ce risque à 0,3%. Il faut rappeler que ce mode de calcul par extrapolation de l'effet des fortes doses aux faibles doses, sans tenir compte du débit de dose, ne repose sur aucune preuve scientifique et ne prend pas en compte les possibilités de réparation des dommages du matériel génétique. C'est une estimation délibérément pessimiste, qui a pour principal intérêt de donner la certitude de ne pas sous-estimer le risque. Il ne s'agit donc pas d'une probabilité, mais d'une limite supérieure du risque, le risque réel se situant quelque part entre 0 et cette limite supérieure.

Quoi qu'il en soit, l'incertitude sur le risque cancérogène est la raison principale pour éviter dans la mesure du possible, toute exposition in utéro ou la plus basse possible en dessous des limites réglementaires.

5. Expositions professionnelles

5. Expositions professionnelles

L'exposition professionnelle concerne des personnes qui travaillent avec des produits radioactifs ou qui sont exposés au cours de leur travail aux rayonnements ionisants émis par des sources naturelles ou artificielles. L'exposition est essentiellement une exposition externe et concerne surtout les sujets masculins. Actuellement, en France, on compte 240000 travailleurs exposés aux rayonnements ionisants répartis dans de nombreux secteurs (médical, industriel, nucléaire...).

5.1. Utilisations industrielles des rayonnements ionisants (2) (49)

Les utilisations industrielles de rayonnements ionisants sont nombreuses et variées, ce qui rend leur présentation difficilement exhaustive. Elles concernent environ 23000 personnes (40).

5.1.1. Techniques de radiographie industrielle

5.1.1.1. Gammagraphie

La gammagraphie est une technique de "radiographie" dans laquelle la source émet des rayonnements gamma. Il y a en France environ 850 appareils de gammagraphie. Les domaines d'utilisation sont nombreux et comprennent le contrôle de soudure dans :

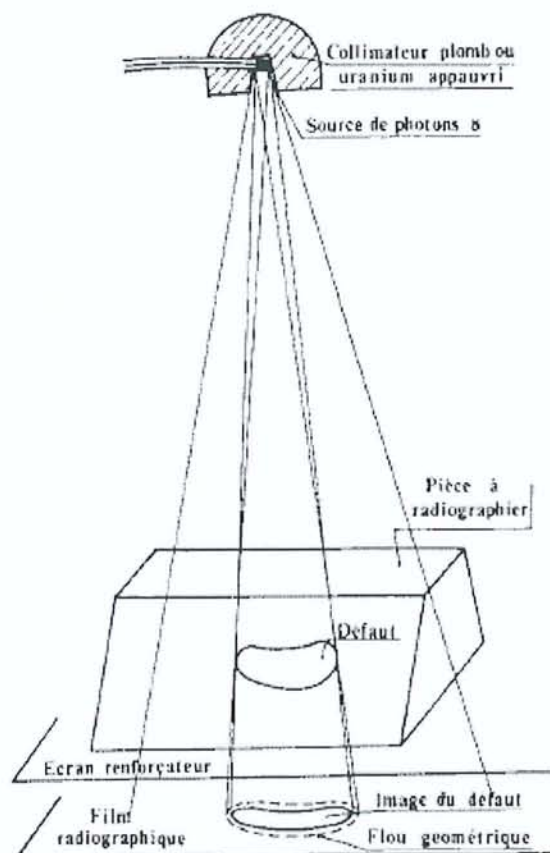
- le génie civil,
- la fonderie,
- la chaudronnerie,
- les poudreries,
- les industries du pétrole et du gaz,
- les constructions mécanique, navale et aéronautique,
- l'armement...

◆ Principe

La pièce à radiographier est placée entre la source de photons gamma et un film radiographique disposé dans une cassette souple ou rigide.

Reliée à un porte-sources, la source gamma est placée en position de stockage et de transport, au milieu d'une protection biologique adéquate (uranium appauvri ou plomb), excluant toute irradiation de l'opérateur (moins de 0,1 mGy/h à un mètre de l'appareil).

Après avoir connecté au projecteur la télécommande (manuelle ou automatique) et la gaine d'éjection, l'opérateur installe le film radiographique et procède au balisage de la zone de travail (calculée en fonction de la nature et de l'activité de la source). Enfin, il effectue le tir par action sur la télécommande : la source vient alors se positionner à l'extrémité de l'accessoire d'irradiation. Après un temps de pose (de quelques secondes à plusieurs heures) dépendant de la nature et de l'épaisseur du matériau radiographié, l'opérateur commande le retour de la source dans le conteneur de stockage et l'enclenchement automatique de plusieurs sécurités.



Formation et enregistrement d'une image gammagraphique
Source : SALLE F. Utilisations industrielles des rayonnements ionisants. DMT (2)

La gammagraphie présente deux avantages :

- un pouvoir de pénétration important et une large gamme d'utilisation, selon l'activité et la nature de la source, de quelques millimètres d'alliages légers à 50 cm de béton.
- Un pouvoir de résolution très élevé (1%) qui peut rendre visible un défaut de soudure de 0,2 mm sur une tôle d'acier de 20 mm.

◆ Radioéléments utilisés

Les principaux radioisotopes utilisés en gammagraphie sont :

- le Cobalt 60 (^{60}Co), émetteur gamma d'énergies de 1,17 à 1,33 MeV (T = 5,5 ans) qui représente 15% du parc mondial des gammagraphies,
- L'Iridium 192 (^{192}Ir), émetteur gamma d'énergies de 200 à 600 keV (T = 74 jours) correspondant à 80% du parc mondial.

◆ Types d'appareils de gammagraphie

On peut différencier les appareils portatifs, les appareils mobiles et les installations fixes.

Les appareils portatifs sont les plus répandus. Projecteurs simples, maniables, légers, ils contiennent des sources de 50 à 120 Ci d' ^{192}Ir (1,8 à 4,4 TBq). Ces appareils ont pourtant été à l'origine de plusieurs accidents d'irradiation (blocage de la source dans la gaine d'éjection, voire même perte de la source). La formation des personnels (institution du CAMARI : certificat d'aptitude à manipuler les appareils de radioscopie et radiologie industrielles) et l'amélioration des matériels ont progressivement augmenté la sécurité de cette technique.

Les projecteurs automoteurs ou mobiles, plus lourds, sont moins nombreux. L'activité de leurs sources est généralement de quelques centaines de Ci d' ^{192}Ir (4 à 20 TBq)

Enfin, les projecteurs fixes de ^{60}Co comprenant des sources de plusieurs milliers de Ci (centaines de TBq) sont réservés au contrôle des fortes épaisseurs. Installés dans des casemates de tir, ils ont très rarement entraîné des incidents.

5.1.1.2. Radiographie X industrielle

◆ Principe

Le parc français des générateurs X est d'environ 1000 appareils. Après accélération des électrons par une différence de potentiel (ddp de 50 à 400 kV) entre deux électrodes, l'impact de ceux-ci sur l'anode entraîne une émission de rayonnements X. Le temps de pose est de quelques dixièmes de seconde à plusieurs dizaines de minutes.

◆ Types d'utilisations

- Les appareils à poste fixe concernent plusieurs types d'industries dont :
 - l'aviation,
 - l'industrie de matières plastiques,
 - les industries mécaniques,
 - la tuyauterie...

Ils sont utilisés pour la radiographie de pièces d'épaisseurs variables. Les sécurités réglementaires excluent en principe tout risque d'accident.

- Les appareils à poste mobile sont utilisés pour le contrôle des tuyauteries sur chantiers. La durée du temps de pose et le caractère mobile de l'installation nécessitent un respect impératif des consignes d'utilisation afin d'éviter une exposition accidentelle.

◆ Radiographie X à l'aide d'accélérateurs

Dernière génération des émetteurs X, ces appareils extrêmement puissants et lourds sont utilisés par quelques grandes industries en postes fixes.

Récemment, a été mis sur la marché un mini-accélérateur mobile d'une énergie de 4 MeV utilisé pour la radiographie sur chantiers de matériaux denses ou épais, type structure de ponts, BTP, radiographie d'obus... Son emploi implique un respect scrupuleux des normes de sécurité.

5.1.1.3. Bêtagraphie (radiographie par électrons)

La technique est réservée au contrôle de feuilles minces de plastique ou de papier et utilise le plus souvent le rayonnement bêta du Carbone 14 (^{14}C). Elle présente un risque limité pour l'opérateur.

5.1.1.4. Neutrographie (radiographie par neutrons)

Elle peut être effectuée soit à l'aide d'un faisceau neutronique issu d'un réacteur expérimental, soit à l'aide d'un accélérateur de neutrons ou d'une source de Californium 252 (^{252}Cf , émetteur de neutrons). Elle est utilisée pour le contrôle des matériaux hydrogénés (poudres, explosifs, plastiques par exemple) et des matériaux de très fortes épaisseurs dans des installations très spécialisées.

A signaler, sur ce même principe, le développement d'une technique de contrôle des bagages dans les aéroports (sans aucun risque pour les opérateurs).

5.1.2. Jauges radiométriques

5.1.2.1. Principe

Les jauges radiométriques sont des appareils de mesure capables de fournir des paramètres variés (niveau, épaisseur, densité) sur des produits finis et manufacturés des exploitations minières, pétrolières et des installations de génie civil.

Une source radioactive scellée émet un rayonnement en direction du système à contrôler. Après interaction avec celui-ci, une partie du rayonnement est recueillie par un détecteur adéquat, générant l'information recherchée.

5.1.2.2. Jauges de niveau

Les plus simples n'indiquent que la présence ou l'absence du matériau sur le trajet horizontal du rayonnement (source et détecteur placés de part et d'autre du matériau). Certaines, plus complexes, renseignent sur la hauteur effective d'un réservoir.

Les radioéléments utilisés sont des émetteurs bêta ou gamma choisis en fonction de l'épaisseur et de la densité du matériau à mesurer et de son contenant. Ces jauges supplantent progressivement celles à flotteur ou à pression ; elles sont fiables, robustes et permettent un asservissement.

Les jauges radiométriques de niveau sont très répandues. Il en existe 3700 en France et sont utilisées pour le contrôle des réservoirs de liquides, des silos (sables, ciment...), le remplissage des petits objets (yaourts, briquets...).

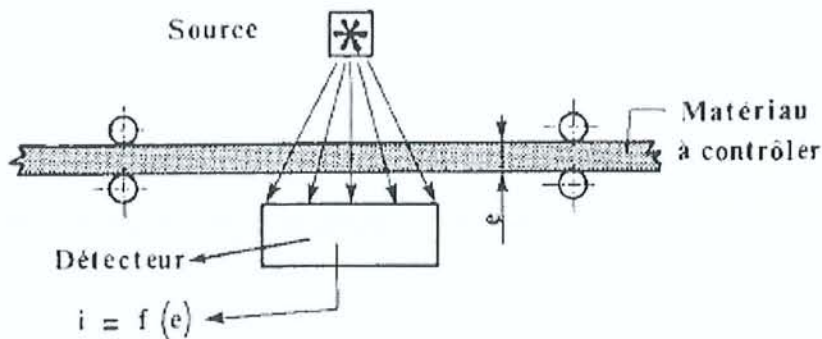


Principe d'une jauge de niveau

Source : SALLE F. Utilisations industrielles des rayonnements ionisants. DMT (2)

5.1.2.3. Jauges d'épaisseur

Si le matériau utilisé est de densité constante, l'intensité du signal reçu par le détecteur sera fonction de l'épaisseur du matériau. Ces jauges sont utilisées pour la mesure en continu de l'épaisseur de produits en feuilles : papiers, tissus, caoutchoucs, plastiques, métallurgie-laminage. Il existe en France 2800 jauges d'épaisseur. La source bêta ou gamma sera fonction de l'épaisseur à contrôler (quelques centièmes de mm à plusieurs dizaines de cm) et de la densité du matériau.



Principe d'une jauge d'épaisseur

Source : SALLE F. Utilisations industrielles des rayonnements ionisants. DMT (2)

5.1.2.4. Jauges de densité

Si l'épaisseur du matériau est constante, le signal sera fonction de la densité. En France, 2300 jauges de ce type sont utilisées pour l'étude de différentes densités des hydrocarbures qui sont présents dans les tuyauteries, les enrobés bitumeux, le tabac...

Les radioéléments sont des émetteurs bêta ou gamma selon les cas.

5.1.2.5. Jauges d'humidité

Leur principe repose sur le ralentissement des neutrons rapides par les noyaux d'hydrogène ou d'autres éléments légers contenus dans le milieu étudié. Leur détection renseigne sur la présence d'eau ou d'hydrocarbures. Elles sont employées pour la mesure d'humidité des sols en agriculture et dans la construction (bâtiment et travaux publics) ainsi que dans la recherche pétrolière (61).

5.1.3. Traceurs radioactifs industriels

5.1.3.1. Principe

Le marquage de quelques individus d'une population permet l'étude du comportement global de cette population. La validité d'un traceur dépendant de son aptitude à suivre fidèlement la population marquée, sans en modifier le comportement, les traceurs radioactifs sont particulièrement performants. Ils marquent l'entité élémentaire qu'est l'atome et permettent une détection facile et sensible (de l'ordre du microcurie par mètre cube, d'où l'utilisation de quantités infimes de radioéléments). Les sources utilisées sont des sources non scellées, avec un risque de contamination accidentelle.

5.1.3.2. Utilisations

- mesure et distribution du temps de séjour d'un produit dans un réacteur chimique : en employant un radioélément à courte période tel le Sodium 24 (^{24}Na), émetteur bêta et gamma, on recherchera par « cartographie » d'un réacteur, des volumes morts, des courts-circuits...
- recherche de fuites dans les canalisations enterrées : le marquage d'un liquide ou d'un gaz par un traceur émetteur gamma permet la détection, à partir de la surface, de fuites dans des canalisations enterrées. Pour les liquides, on peut employer le carbonate de sodium marqué au ^{24}Na ; pour les gaz, le bromure de méthyle marqué au Brome 82 (^{82}Br).
- contrôle de l'étanchéité d'objets scellés : on peut rechercher d'éventuelles fuites vers l'intérieur d'un objet scellé comme un transistor par exemple en utilisant un gaz radioactif tel que le Krypton 85 (^{85}Kr , émetteur bêta).
- mesure des débits : l'utilisation de radioéléments comme traceurs permet de mesurer les débits de liquides dans des canalisations, ou le débit de fleuves, de sources souterraines... Sont principalement employés : le Brome 82 (^{82}Br), l'Iode 131 (^{131}I), le Chrome 51 (^{51}Cr).
- mesure des usures : l'incorporation de Tungstène 187 (^{187}W) dans une dent d'un outil de coupe permet, grâce à la mesure de la radioactivité des copeaux, d'évaluer la rapidité

d'usure de l'outil. Après marquage d'une bille d'un roulement à billes, la radioactivité de la graisse sera proportionnelle à l'usure de ce roulement. De même, le marquage d'une pièce de moteur permettra, grâce à la mesure de la radioactivité de l'huile de graissage, d'évaluer l'usure de ses constituants.

5.1.4. Applications reposant sur le principe de l'ionisation des gaz

Plusieurs applications industrielles des rayonnements ionisants reposent sur leur aptitude à ioniser les gaz, de façon différente selon leur nature et leur énergie.

5.1.4.1. Elimination de l'électricité statique

La présence d'électricité statique sur des substances isolantes (papiers, plastiques, textiles artificiels, poudres, explosifs...) peut entraîner des inconvénients : l'attraction de poussières, le colmatage de feuilles entre elles, le risque d'étincelles et d'explosions...

L'utilisation de sources radioactives, souvent sous forme de ruban placé en fin de machine à quelques millimètres du matériau, permet en rendant l'air avoisinant conducteur de supprimer l'électricité statique. Les sources utilisées peuvent être des sources scellées d'Américium 241 (^{241}Am , émetteur alpha) ou de Tritium (^3H , émetteur bêta).

5.1.4.2. Détecteurs de fumées

Deux chambres d'ionisation sont disposées en série : l'une fermée servant de témoin, la deuxième grillagée en contact avec l'air ambiant. Dans chacune de ces chambres, une petite source scellée alpha (quelques microcuries d' ^{241}Am soit quelques dizaines de kBq) délivre, en air normal, un courant constant. Si des particules de fumée ou des macromolécules de pyrogénéation pénètrent dans la chambre ouverte, elles entraînent une variation de courant qui déclenche un signal d'alarme.

Il y a en France 3 millions et demi de détecteurs de fumées basés sur ce principe, qui ne présentent aucun danger pour la population (sources scellées alpha).

5.1.4.3. Paratonnerres radioactifs

L'idée qui date de 1914, était d'augmenter l'efficacité du paratonnerre par l'adjonction du Radium 226 (^{226}Ra), puis à partir de 1940 d' ^{241}Am , à la pointe du paratonnerre. Ceux-ci sont interdits depuis janvier 1986. Il faut noter cependant le risque virtuel de contamination que présenterait le recyclage d'anciens paratonnerres radioactifs.

5.1.4.4. Autres applications dérivées

- Les peintures luminescentes : la fluorescence d'une peinture est en permanence excitée par l'ionisation créée par un sel radioactif qui lui est intimement mêlé. Le Tritium a remplacé dès 1960 le ^{226}Ra pour la luminescence des montres et réveils.

- Les batteries nucléaires : progressivement supplantées par les batteries de Lithium, les batteries au Plutonium 238 (^{238}Pu) ont été utilisées pour les stimulateurs cardiaques, les satellites, les sondes lunaires, les installations météorologiques lointaines...

5.1.5. Biologie végétale et radioagronomie

5.1.5.1. Recherches sur la photosynthèse

Il s'agit de l'étude du cycle du gaz carbonique et de l'oxygène dans la respiration cellulaire, grâce à l'utilisation du Carbone 14 (^{14}C) et du Phosphore 32 (^{32}P , émetteurs bêta). Ces sources non scellées sont utilisées en petites quantités dans des laboratoires spécialement équipés.

5.1.5.2. Radiomutagenèse

Application basée sur l'aptitude des rayonnements ionisants (essentiellement les rayons gamma du Cobalt 60) à provoquer sur des végétaux cultivés des modifications, dont certaines seront transmissibles par voie végétative ou sexuée (apparition d'une mutation). Il s'agit par exemple de résistance à des maladies (mildiou de la vigne), de précocité de développement (soja), d'amélioration de la qualité technologique (riz)...

5.1.5.3. Radioconservation des denrées

La première irradiation alimentaire eut lieu en 1958 en ex-URSS sur la pomme de terre. Actuellement en plein développement, la radioconservation des denrées utilise le rayonnement gamma du ^{60}Co ou les électrons accélérés (d'une énergie inférieure à 10 MeV). N'entraînant aucune radioactivité induite au sein des aliments, cette technique permet d'obtenir trois résultats selon la dose reçue (de quelques dizaines de grays à 10^4 grays) :

- augmentation de la durée de conservation par ralentissement de la maturation (fruits), par ralentissement de la germination (légumes), par réduction du nombre de microorganismes responsables de détériorations (poisson, viande),
- élimination des insectes nuisibles dans les denrées stockées (céréales, farines, fruits, poissons séchés),
- assainissement bactérien par destruction de microorganismes pathogènes (volailles, œufs...).

Les avantages de l'irradiation alimentaire, par rapport aux autres méthodes dites classiques, sont les suivants :

- pas d'élévation de la température du produit, donc pas d'altération des principes nutritifs,
- excellente pénétration de rayonnement, permettant l'irradiation de l'aliment dans son emballage définitif. Il n'y a donc pas de source possible de recontamination ultérieure,
- pas de nuisance chimique comme celle de la fumigation par exemple.

Les obstacles à cette technique sont d'ordre économique, avec des investissements de départ importants mais les coûts d'exploitation sont réduits, et surtout psychologiques avec la réticence d'une partie de la population.

Des organismes experts sont chargés de délivrer les autorisations d'ionisation alimentaire en fonction des produits.

Il existe actuellement en France 7 installations d'irradiation alimentaire (5 irradiateurs gamma et 2 accélérateurs d'électrons). Le principe de fonctionnement est identique : à l'intérieur d'une casemate blindée, les produits irradiés sont transportés dans leur emballage définitif grâce à un convoyeur automatique autour de la source radioactive, après que celle-ci eut été sortie de sa position de stockage. Compte tenu des sécurités de radioprotection, les risques d'irradiation accidentelle pour l'opérateur sont nuls.

Une autre utilisation fréquente des rayonnements ionisants peut être rapprochée de l'irradiation alimentaire : c'est la radiostérilisation du matériel médico-chirurgical (en particulier des gants de chirurgie). Cette stérilisation par rayonnement gamma s'effectue également sur le matériel déjà placé dans son emballage définitif et évite les effets toxiques de l'oxyde d'éthylène.

Les sources scellées de Cobalt 60 ou de Césium 137 sont utilisées pour l'irradiation des produits sanguins, permettant d'inhiber la division lymphocytaire afin d'éliminer le risque de maladie post-transfusionnelle chez les patients immuno-déprimés.

5.1.6. Sciences de la terre

5.1.6.1. Diagraphie et prospection minière

C'est l'étude de la nature géologique et des propriétés des sous-sols à partir de forages où sont introduites des sondes de mesure utilisant des sources de rayonnement gamma ou de neutrons. Les sondes gamma (^{60}Co ou ^{137}Cs) renseignent sur la nature des roches, leur densité; les sondes de neutrons (Américium - Béryllium ou ^{252}Cf) sur la teneur en hydrogène et l'humidité des sols. Il existe environ 50 sondes de diagraphie en France, exploitées par un personnel spécialisé.

5.1.6.2. Hydrologie

Outre leur emploi pour la mesure des débits, les sources radioactives généralement non scellées peuvent être utilisées comme traceurs en hydrologie :

- étude de la migration des polluants avant l'implantation d'un complexe industriel,
- recherche de fuites sur des barrages,
- étude du déplacement des sédiments (impact d'un nouvel aménagement portuaire sur le littoral),
- étude systématique des sites portuaires importants,
- recherches générales sur l'action de la houle sur les fonds marins,

- étude du devenir des métaux lourds en milieu estuarien...

Pour toutes ces applications, on utilise des traceurs radioactifs émetteurs gamma (quelques dizaines à centaines kBq ^{131}I , ^{198}Au , ^{192}Ir ou ^{82}Br ...) qu'on incorporera au sédiment à étudier. La détection se fera par bateau ou par hélicoptère : 2 à 10 litres de vase marquée, 1 kilo de sable marqué, quelques centaines de galets marqués suffisent pour une étude de grande ampleur.

5.1.7. Applications basées sur le principe de la polymérisation et de la réticulation radio-induites

De nombreuses applications industrielles des rayonnements ionisants reposent sur leur faculté à former des radicaux libres dans le matériau irradié (gamma du ^{60}Co ou électrons accélérés). Ces radicaux libres, très réactifs, vont pouvoir jouer le rôle d'initiateurs dans plusieurs réactions : polymérisation de monomères vinyliques, réticulation et durcissement de mélanges prépolymériques et donc modification des propriétés mécaniques des matériaux.

Ces réactions chimiques, radio-induites, sont utilisées dans des secteurs très variés tels que :

- le textile : hydrophile, ininflammabilité, résistance aux taches, traitement infroissable, imperméabilité...
- le plastique et le caoutchouc : fabrication de câbles électriques infusibles, films d'emballage thermorétractables, industrie du pneu...
- le génie médical : fabrication de lentilles souples hydrophiles ou de membranes de séparation (dialyse, osmose)...
- L'industrie des revêtements : fabrication de composés bois-plastiques (parqueterie), enduits ou vernis radiodurcissables, laquage de tôles métalliques...
- Le traitement du bois en l'imprégnant sous vide d'une résine liquide polymérisée par irradiation pour obtenir des composés bois-plastiques imputrescibles, durs et résistants à l'abrasion.

Enfin la préservation des biens culturels repose sur ces mêmes principes :

- désinfection ou destruction d'organismes vivants par irradiation. A noter que la momie de RAMSES a été « stérilisée à vie » dans sa vitrine d'exposition au Centre de Saclay, en 1976, par une exposition aux rayonnements gamma de 18 kGy,
- consolidation de statues ou de pièces archéologiques par radio-durcissement de plastiques liquides incorporés au cœur du matériau (bois ou pierre).

5.1.8. Coloration des matériaux isolants

L'exploitation industrielle de la coloration induite par l'irradiation dans les matières isolantes, et plus spécialement dans le verre, a donné lieu à l'élaboration de procédés permettant de conférer les teintes les plus diverses à des objets à vocation décorative tels que des flacons utilisés en parfumerie ou aux conditionnements destinés à contenir les produits ménagers. La

coloration obtenue est durable, parfaitement reproductible et son intensité peut être graduée à volonté grâce à la dosimétrie très précise mise en œuvre par ces traitements ionisants (23).

5.1.9. Utilisation industrielle du Thorium (81)

Le Thorium, abandonné dans le domaine médical, est utilisé depuis longtemps dans l'industrie. Actuellement ses principales applications, hormis son utilisation nucléaire, sont les suivantes :

- il entre dans la fabrication des manchons de lampes à gaz des lampes à incandescence, dans la composition de certaines électrodes utilisées dans la soudure TIG (tungstène inert gas). Ces électrodes sont néanmoins progressivement remplacées depuis quelques années par des électrodes au lanthane,
- industrie aéronautique : cette industrie utilise fréquemment les alliages magnésium - Thorium. Le Thorium mélangé au magnésium permet, en raison de ses propriétés physiques remarquables, de renforcer la résistance thermique de ses alliages,
- électronique : associée à différents métaux, la thorie forme un alliage céramique-métal employé comme source d'électrons,
- production de céramiques et de matériaux réfractaires : la thorie est également utilisée pour la fabrication de creusets servant à la coulée de métaux en fusion et comme composant de résistance pour les fours à haute température,
- industrie chimique : la thorie sert de catalyseur dans des réactions d'hydrogénation et de déshydrogénation.

5.1.10. Conclusion

La dose annuelle moyenne reçue par les travailleurs est de 5,5 mSv. 8,2 % des salariés des industries non nucléaires ont été soumis à une dose supérieure à 15 mSv en 1993. Le nombre de travailleurs ayant reçu une dose supérieure à 50 mSv est de 14.

L'utilisation des sources non scellées étant limitée, le risque principal de ces applications reste celui d'une exposition externe accidentelle par radioémetteur gamma. Une attention particulière sera apportée à la gammagraphie industrielle, technique à l'origine de plusieurs accidents. L'amélioration des matériels, la formation des opérateurs ont permis de diminuer de façon considérable les risques (61).

5.2. Exposition professionnelle médicale aux rayonnements ionisants

Le secteur médical est le premier utilisateur de rayonnements ionisants, mais il ne s'agit en pratique que de faibles doses que l'on essaie de réduire au maximum. Il emploie actuellement environ 140000 personnes.

On utilise les rayonnements ionisants dans un but diagnostique et thérapeutique dans trois disciplines : le radiodiagnostic, la radiothérapie et curiethérapie et la médecine nucléaire. Ces services peuvent être scindés en deux groupes :

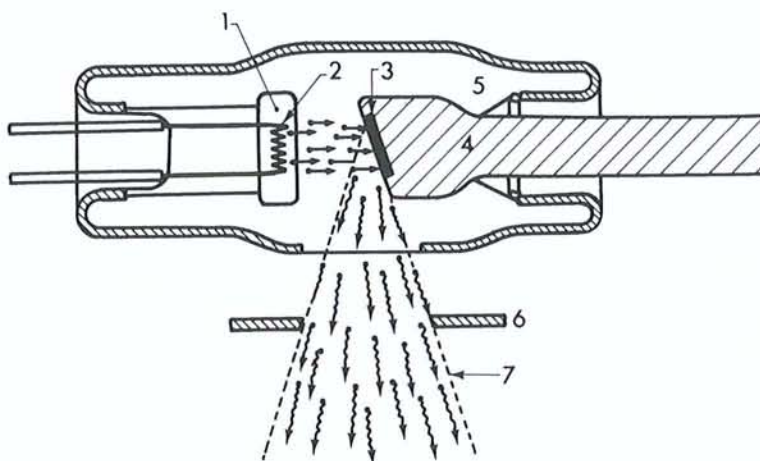
- ceux pour lesquels il existe un risque d'exposition externe : services de radiodiagnostic, de radiothérapie et de curiethérapie,
- ceux dans lesquels il existe un risque d'exposition externe et interne : services de médecine nucléaire.

5.2.1. Services de radiodiagnostic (88)

5.2.1.1. Services de radiodiagnostic classique

On désigne sous le nom de radiodiagnostic l'ensemble des procédés d'exploration du corps humain utilisant les rayons X. Le radiodiagnostic est fondé sur la grande pénétration des rayons X dans les tissus et sur leur inégale atténuation par les divers constituants de l'organisme. Il concerne les domaines médical, dentaire et vétérinaire.

♦ La radiologie conventionnelle est constituée d'un tube à rayons X formé d'une cathode et d'une anode. Le faisceau de rayons X qui traverse le sujet est reçu sur un film radiographique. La cathode est constituée par un filament de tungstène qui est chauffé et fait naître un nuage d'électrons. La différence de potentiel appliquée au tube accélère le faisceau d'électrons qui se dirige vers l'anode et interagit avec les noyaux et les électrons périphériques des atomes du métal constituant l'anode. Ces interactions sont à l'origine de la production des rayons X.



Tube à rayons X à anode fixe

1 : Cathode ; 2 : filament incandescent, source d'électrons ; 3 : cible de l'anode en tungstène ; 4 : corps de l'anode souvent en cuivre pour dissiper la chaleur ; 5 : espace sous vide ; 6 : diaphragme plombé ; 7 : faisceau de rayons X utiles

Source : Monnier J.P. Pratique des techniques de radiodiagnostic (88)

Le faisceau de rayons X issu du tube est composé de rayonnements de longueur d'onde d'énergie différente. Les rayons X très peu pénétrants ne participent pas à la formation de l'image radiographique car ils sont arrêtés par la peau et les premiers centimètres du corps ; ils irradient donc inutilement le sujet ; ils constituent le *rayonnement primaire*. Pour arrêter ces composants de faible énergie, un filtre inamovible en aluminium est placé à la sortie du

tube. Il ne modifie que très peu le rayonnement utile à la formation de l'image radiographique.

Certaines régions, présentant un contraste naturel insuffisant, peuvent être analysées après introduction d'un produit de contraste iodé (exploration vasculaire, urographie intra-veineuse, opacification du tube digestif par produit iodé ou baryté, opacification des cavités articulaires (arthrographie)...

♦ Le scanner ou tomodensitométrie utilise les rayons X, mais remplace le film photographique par un détecteur électronique qui transforme les rayons X qu'il reçoit en signal électrique. Ces détecteurs sont 100 fois plus sensibles que le film radiographique et permettent de déceler les différences minimales d'absorption.

La tomodensitométrie a pour but de reconstituer des images de coupes du corps humain à partir des mesures de coefficients d'atténuation par les tissus d'un faisceau de rayons X émis par un tube à rayons X tournant autour du patient.

Les risques encourus par le personnel en radiodiagnostic médical, dentaire et vétérinaire sont uniquement des risques d'exposition externe due au rayonnement primaire provenant directement de l'anode du tube et à divers rayonnements secondaires (rayonnement diffusé par le patient, rayonnement de fuite). La dose délivrée au personnel doit être quasi nulle. Lorsque les films reviennent avec un résultat positif, il s'agit généralement de doses faibles de l'ordre de 0,3 à 0,4 mSv.

5.2.1.2. Radioscopie et amplificateur de brillance

- La radioscopie conventionnelle utilise un écran fluorescent qui s'éclaire sous l'effet des rayons X. Les indications de la radioscopie doivent être limitées à l'étude des phénomènes dynamiques. L'exposition du praticien est beaucoup plus importante que la radiographie conventionnelle.
- L'amplificateur de brillance est un tube électronique de verre dans lequel on a fait le vide. A l'extrémité du tube tourné vers le patient se trouve un écran fluorescent qui s'illumine dans les conditions habituelles sous l'effet des rayons X ; le rayonnement lumineux de cet écran primaire frappe la photo-cathode qui est située juste en arrière de lui. La photo-cathode émet des électrons. Ces électrons sont accélérés dans le vide du tube par une différence de potentiel vers un écran secondaire. L'image de l'écran secondaire est beaucoup plus lumineuse que celle de l'écran primaire du fait de la réduction de la surface et de l'augmentation de la vitesse des électrons. Cette image de l'amplificateur de brillance peut être recueillie par une caméra de télévision et retransmise sur un récepteur permettant l'observation à la lumière du jour.

Les amplificateurs de brillance sont utilisés lors de certaines techniques radiologiques (coronarographies), au bloc opératoire (cathétérisme cardiaque), lors des actes dits de radiologie interventionnelle.

5.2.1.3. Radiologie interventionnelle

Elle regroupe un certain nombre de techniques radiologiques ayant pour but d'éviter le recours à la chirurgie :

- la montée d'une sonde vasculaire sous contrôle radiologique permet le traitement de diverses affections (dilatation d'une sténose artérielle par une sonde à ballonnet, embolisation d'une malformation vasculaire ou d'une tumeur par injection locale de micro-particules, dissolution d'un caillot par administration de fibrinolytiques à son voisinage),
- le guidage de matériel de ponction permet des prélèvements cytologiques tumoraux, le drainage d'abcès.

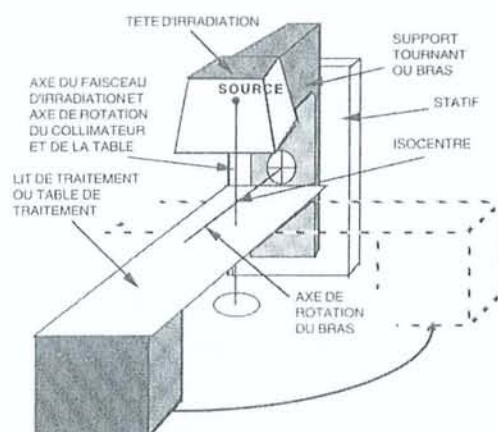
Ces techniques non invasives connaissent un grand développement. Elles sont responsables d'une utilisation intensive des rayons X entraînant un risque d'exposition non négligeable, voisin des limites de doses, en particulier pour les chirurgiens et les radiologues qui sont proches du patient et du tube à rayons X. Il s'agit d'actes nécessitant un temps de scopie long et / ou de nombreux clichés. Le personnel est soumis au rayonnement diffusé par le patient mais également au rayonnement primaire (69) (61).

5.2.2. Services de radiothérapie (85)

La radiothérapie est une méthode thérapeutique utilisée dans le traitement des cancers qui réalise la destruction des cellules malignes par l'action des rayonnements ionisants de différentes natures (photons, électrons, protons, neutrons, particules alpha) et de différentes énergies tout en préservant au mieux les tissus sains avoisinants.

Nous distinguons la radiothérapie externe et la curiethérapie (que nous verrons dans le paragraphe suivant).

Les appareils utilisés en radiothérapie externe sont constitués d'un appareil de traitement composé d'une table qui supporte le patient pendant l'irradiation et de l'appareil d'irradiation. Ce dernier est constitué d'un statif fixé au sol ou au mur qui supporte un bras rotatif contenant la source de rayonnement.



Constitution d'un appareil de traitement

Source : GAMBINI D.J. Manuel pratique de radioprotection (61)

On distingue les générateurs de rayons X de basse et moyenne fréquence, les appareils de télécobalthérapie et les accélérateurs de particules.

◆ Les générateurs de rayons X de basse et moyenne fréquence

La production de faisceaux de photons résulte de l'interaction d'un faisceau incident constitué d'électrons accélérés avec les atomes d'une cible.

Les appareils sont constitués d'un tube à rayons X contenant un générateur d'électrons (filament), d'un dispositif d'accélérateur des électrons et d'une cible.

Les électrons sont émis par effet photo - électrique à partir d'un filament chauffé qui joue le rôle de cathode puis ils sont accélérés et viennent frapper une cible portée à un potentiel positif, source de rayons X.

◆ Les appareils de cobalthérapie

La source radioactive utilisée est le Cobalt 60 qui émet un rayonnement gamma. Contrairement aux appareils à rayons X pour lesquels l'irradiation est arrêtée dès que la tension n'est plus appliqué, la source de Cobalt 60 produit en permanence des rayons gamma, d'où la présence d'un bloc de protection dans lequel la source se met en place dès la fin du traitement.

Ces appareils sont équipés d'un bras isocentrique permettant l'irradiation sous diverses incidences sans déplacer le patient.

◆ Les accélérateurs d'électrons

Ils comprennent les bétatrons et les accélérateurs linéaires, ces derniers étant les plus utilisés. De la même façon que dans un tube à rayons X, les électrons produits par effet thermoionique sont accélérés de façon à acquérir suffisamment d'énergie. Ils sont alors utilisés tels quels (faisceau d'électrons) ou bien vont frapper une cible de façon à produire des photons de freinage (faisceau de rayons X).

Les services de radiothérapie occupent deux types de locaux :

- les locaux où sont situés les sources sont des zones contrôlées (signalées par un balisage approprié) interdites au personnel pendant le fonctionnement de l'appareil,
- le poste de télécommande se trouve dans le local adjoignant, accessible sans passer par la salle de radiothérapie ; un dispositif de télésurveillance permet de garder le contact avec le patient.

Les risques encourus sont faibles et les causes accidentelles d'exposition sont exceptionnelles. Il peut s'agir soit d'une défaillance de la sécurité de la porte qui n'arrête pas l'irradiation lors de l'ouverture de celle-ci, soit d'un blocage de la source de Cobalt. Dans ce cas, la commande à partir du pupitre ne fonctionne plus ; la manipulatrice doit alors entrer dans la salle de traitement, contourner le faisceau et faire rentrer la source par l'intermédiaire du dispositif manuel se trouvant sur le porte-source.

En pratique, ce sont des sources très sûrs du point de vue de la radioprotection ; il est possible d'y laisser travailler les femmes enceintes, à condition qu'elles n'aient pas à intervenir en cas d'urgence.

5.2.3. Services de curiethérapie

Dans ces services, les malades deviennent eux-mêmes des sources. Ils exposent leur entourage à une exposition externe.

La curiethérapie est un moyen de traitement des tumeurs malignes solides par mise en place de sources radioactives à l'intérieur de l'organisme.

En curiethérapie classique ou à bas débit de dose, deux techniques sont principalement utilisées :

- La curiethérapie interstitielle pour les cancers ORL, cutanés ou mammaires. Elle consiste à poser des sources d'Iridium 192 (^{192}Ir), émetteur β^- , γ à l'intérieur des tissus.
- La curiethérapie endocavitaire avec pose de fils d'Iridium 192 ou de sources de Césium 137 (^{137}Cs), émetteur γ , pour les indications gynécologiques. Ces sources sont placées dans les cavités naturelles de l'organisme. Le Radium n'est plus utilisé depuis quelques années.

Pour les deux types de sources, on distingue les salles d'implantation et les chambres d'hospitalisation.

5.2.3.1. Salles d'implantation

◆ Préparation des fils d'Iridium 192

Ils se préparent sur des paillasse protégées par des briques de plomb et par un hublot de verre plombé. Les manipulations consistent à introduire des fils d'une longueur de 10 cm environ dans une petite gaine plastifiée très fine à l'aide de pinces d'environ 30 cm pour éviter l'exposition des extrémités. Seule la rapidité d'exposition permet dans ce type de poste d'éviter cette exposition.

◆ Techniques actuelles d'implantation

Chargement différé pour ^{192}Ir : toute la préparation s'effectue avec un guide inactif, la localisation est contrôlée radiologiquement et ce n'est qu'au dernier moment que l'Iridium est introduit.

Chargement à distance pour ^{137}Cs : Le Césium n'a pas besoin d'être préparé. Il est livré sous forme de petites billes dans une gaine prête à l'emploi. Le récepteur de commande est placé au niveau gynécologique, au bloc opératoire. La malade est ensuite ramenée dans sa chambre où le récepteur de source est relié par une gaine à un projecteur qui contient la source de

Césium. La manipulatrice sort ensuite de la chambre et effectue le chargement de la malade par l'intermédiaire du poste de commande situé à l'extérieur de la chambre.

5.2.3.2. *Chambres d'hospitalisation*

◆ Si le malade est chargé au Césium, l'utilisation du projecteur de source permet une radioprotection complète car la source est coupée au moment de l'entrée dans la chambre. Il faut cependant savoir que le Césium a une période de 30 ans et qu'à un mètre de distance d'un malade chargé au Césium, le débit horaire est de 0,5 mSv; c'est-à-dire qu'il suffirait de 8 heures par mois de présence à 1 mètre de ce malade pour entraîner une exposition de 4 mSv.

◆ Si le malade est chargé à l'Iridium, le personnel doit respecter les principes de radioprotection (réduction du temps d'exposition, augmentation de la distance et présence d'un écran), rendant les soins malaisés. L'Iridium a une période de 74 jours et le débit horaire à 1 mètre de distance d'un fil d'¹⁹²Ir de 10 cm est 5 fois inférieur à celui du Césium : il est de 0,1 mSv par heure.

5.2.3.3. *Nouvelles technologies*

La curiethérapie à débit de dose pulsé permet une meilleure protection du personnel. Elle utilise un projecteur contenant une seule petite source d'Iridium 192, la dose totale est délivrée en plusieurs fractions. De plus, l'Iridium n'a plus besoin d'être préparé par le personnel. La source est livrée par le fabricant du projecteur et est changée tous les trimestres. Elle est utilisée essentiellement dans la curiethérapie interstitielle. En France, on souhaite utiliser ce type de projecteur en remplacement de la curiethérapie classique.

Il existe également la curiethérapie à haut débit de dose. Il s'agit de la curiethérapie endoluminale utilisée dans le cas de cancers bronchiques ou œsophagiens. Elle utilise des projecteurs de source qui sont du même type que les projecteurs à débit de dose pulsé. Ils contiennent une seule source d'Iridium 192.

Si le personnel est bien formé, les résultats de dosifilms doivent rester très faibles, de l'ordre de 3 à 4 mSv annuels. Cependant, des incidents peuvent survenir et font préférer la mutation des femmes enceintes dans un autre service.

5.2.4. **Services de médecine nucléaire**

Dans ces services, les malades se transforment également en « sources » et l'utilisation des sources non scellées expose au risque d'exposition externe et interne. La technique utilisée consiste en l'administration d'une substance radioactive au patient par voie orale ou intraveineuse puis au comptage par voie externe des différents paramètres à étudier.

5.2.4.1. Principaux radioéléments utilisés

Les principaux radioéléments utilisés sont par ordre de fréquence le Technétium 99m (^{99m}Tc), puis l'Iode 123 (^{123}I) et l'Iode 131 (^{131}I).

- ^{99m}Tc est utilisé pour les scintigraphies osseuses, pulmonaires, hépatiques et thyroïdiennes;
- ^{131}I est utilisé en thérapie et de moins en moins en diagnostic, en raison de son fort pouvoir irradiant (période de 8 jours). Il sert dans le traitement des cancers de la thyroïde et en immunoscintigraphie (scintigraphie après injection d'anticorps spécifiques de cellules tumorales marquées) ;
- ^{123}I sert pour les actes diagnostiques, en particulier les scintigraphies thyroïdiennes et le marquage de la MIBG (métalodobenzylguanidine) lors des scintigraphies réalisées dans le bilan d'extension d'un phéochromocytome ou d'un neuroblastome.

Bien d'autres radioéléments sont utilisés :

- Le Krypton 21m dont la période est très courte, 13 secondes seulement, permet l'exploration de la ventilation pulmonaire avec une très faible irradiation.
- le Thallium 201 (^{201}Tl) est employé en scintigraphie myocardique pour les recherches et quantifications d'infarctus,
- le Gallium 67 (^{67}Ga) est utilisé pour la localisation scintigraphique des extensions des lymphomes,
- le Chrome 51 (^{51}Cr) pour la mesure des volumes sanguins...

♦ ^{99m}Tc est obtenu à partir d'un générateur à Technétium. Celui-ci doit être sorti de son fût, puis placé sur le banc de préparation.

Ce radioélément peut être administré sous forme :

- d'un sel soluble, le petchnate de Technétium pour l'exploration de la thyroïde ou du cerveau,
- de colloïde pour l'exploration hépatique,
- de macroagrégats pour les scintigraphies pulmonaires de perfusion,
- associé à diverses molécules pour les exploration rénales et cardiaques.

Lors des préparations et des injections, le problème majeur est celui de l'exposition des mains.

Lors de la préparation, il est nécessaire d'utiliser des pinces chaque fois que possible (émission gamma) pour limiter l'exposition des extrémités. Il est préférable d'opérer dans une boîte à gants qui permet de travailler dans des conditions plus strictes ou au moins sur une paillasse recouverte de papier « benchkoke », derrière une protection plombée, avec des gants.

L'injection au patient s'effectue avec une seringue placée dans un protège seringue en tungstène : la rapidité d'exécution de l'injection, élément important de radioprotection,

dépend beaucoup de la compétence et de l'ancienneté de la technicienne. En cas de difficultés pour piquer, la technicienne doit alors poser l'index sur l'embout peu protégé de la seringue.

Pour une seringue contenant 25 mCi (soit environ 1 GBq) de ^{99m}Tc , l'exposition au contact du protège-seringue est de 0,01 mSv et de 0,5 mSv pour l'embout de la seringue.

Il est donc important d'évaluer l'exposition du pouce et de l'index des techniciennes à l'aide de films thermoluminescents portés 3 ou 4 mois. L'exposition annuelle des extrémités se situe en général autour de 10 à 20 % de la limite annuelle réglementaire pour les extrémités (égale à 500 mSv).

◆ L'Iode est utilisé dans les services de médecine nucléaire sous forme d' ^{131}I ou d' ^{123}I .

Il peut être administré par voie intra-veineuse ou par voie orale (liquide ou comprimés). Le risque lors des manipulations d'iode radioactif est lié à sa volatilité. Il est donc impératif de préparer les formes liquides dans les boîtes à gants. Pour le traitement des cancers thyroïdiens, l'utilisation des comprimés dosés permet de limiter le risque de contamination.

5.2.4.2. Hospitalisation des malades

Les malades traités par ^{131}I pour cancer thyroïdien sont hospitalisés 5 à 7 jours. Une scintigraphie corporelle est faite au sixième jour.

L'hospitalisation se fait dans une chambre individuelle spéciale, avec des murs plombés et des toilettes présentant une séparation des selles et des urines. Ces dernières sont recueillies dans une cuve de décroissance où elles sont stockées, puis après une période d'attente et de contrôle de la radioactivité résiduelle, la cuve est vidée dans les égouts.

En l'absence de cuve, les urines des 48 premières heures doivent être gardées pendant environ 3 mois avant d'être rejetées dans les égouts.

5.2.4.3. radiothérapie métabolique

L'acte thérapeutique consiste à administrer un produit radioactif destiné à se concentrer dans les variétés cellulaires dont on souhaite la destruction sélective. Les doses administrées doivent être fortes et on choisit volontairement des radioéléments irradiants contrairement aux actes de diagnostic où on utilise les radioéléments les moins irradiants. Cependant, il faut limiter la doses délivrée aux tissus sains. C'est le rayonnement bêta qui contribue dans ce cas à l'essentiel de l'irradiation.

A côté du traitement des polyglobulies, des pleurésies et des ascites par le Phosphore 32, l'acte thérapeutique principal est l'administration d'Iode 131 pour l'hyperthyroïdie et pour le cancer différencié de la glande thyroïde.

On utilise également le Rhénium 186, l'Erbium 169 pour les synoviorthèses, le Strontium 89, le Samarium 153 pour traiter les métastases osseuses. Quant au Yttrium 90, il est utilisé dans le traitement des cancers et les synoviorthèses.

5.2.5. Conclusion (61)

L'exposition du personnel du secteur médical est faible. Les valeurs publiées par l'OPRI (Office de Protection contre les Rayonnements Ionisants) des doses individuelles annuelles moyennes et des pourcentages de travailleurs exposés à moins de 5 mSv dans les professions médicales figurent sur le tableau suivant :

L'exposition professionnelle dans le secteur médical :

Type d'activité	Dose individuelle annuelle moyenne en 1993 (mSv)	Pourcentage des travailleurs exposés à moins de 5 mSv
Radiodiagnostic médical	3,2	91 %
Radiodiagnostic dentaire	2	95 %
Radiothérapie externe	3,2	88 %
Curiethérapie	3,5	96 %
Médecine nucléaire		
- in vivo	2	94 %
- in vitro	1,6	100 %

C. Lefaure, G. Abadia, B. Aubert. Journées SFRP, La Rochelle, 20-21 septembre 1994.

Les statistiques françaises indiquent que dans le secteur médical, en 1993, 3,3 % des travailleurs exposés ont reçu des doses supérieures à 15 mSv et que le nombre de salariés ayant reçu une dose supérieure à 50 mSv est de 54. Les cas de dépassement de limites enregistrés sont observés exclusivement dans les secteurs médical et industriel non électronucléaire.

En pratique, les doses reçues par le personnel dans un service de radiodiagnostic, peu différentes de celles du personnel de radiothérapie et de médecine nucléaire, dépendent des caractéristiques et des conditions d'exploitation de l'installation.

En radiodiagnostic vétérinaire, l'exposition professionnelle est faible, la dose moyenne est de 1 à 2 mSv par an.

5.3. Exposition professionnelle dans les centrales nucléaires (2) (48)

L'énergie nucléaire fournit aujourd'hui les trois quarts de l'électricité nécessaire en France où 21 sites de centrales nucléaires regroupent 56 réacteurs nucléaires en service et 4 en construction. L'énergie produite dans une centrale nucléaire provient de la fission des noyaux d'Uranium.

La fission des noyaux d'Uranium dans le cœur du réacteur produit de la chaleur qui est transportée par un fluide caloporteur (circuit primaire). Elle est ensuite transmise à un deuxième circuit eau-vapeur par l'intermédiaire d'un échangeur : l'eau du circuit secondaire se transforme en vapeur. La vapeur ainsi produite fait tourner une turbine qui entraîne un

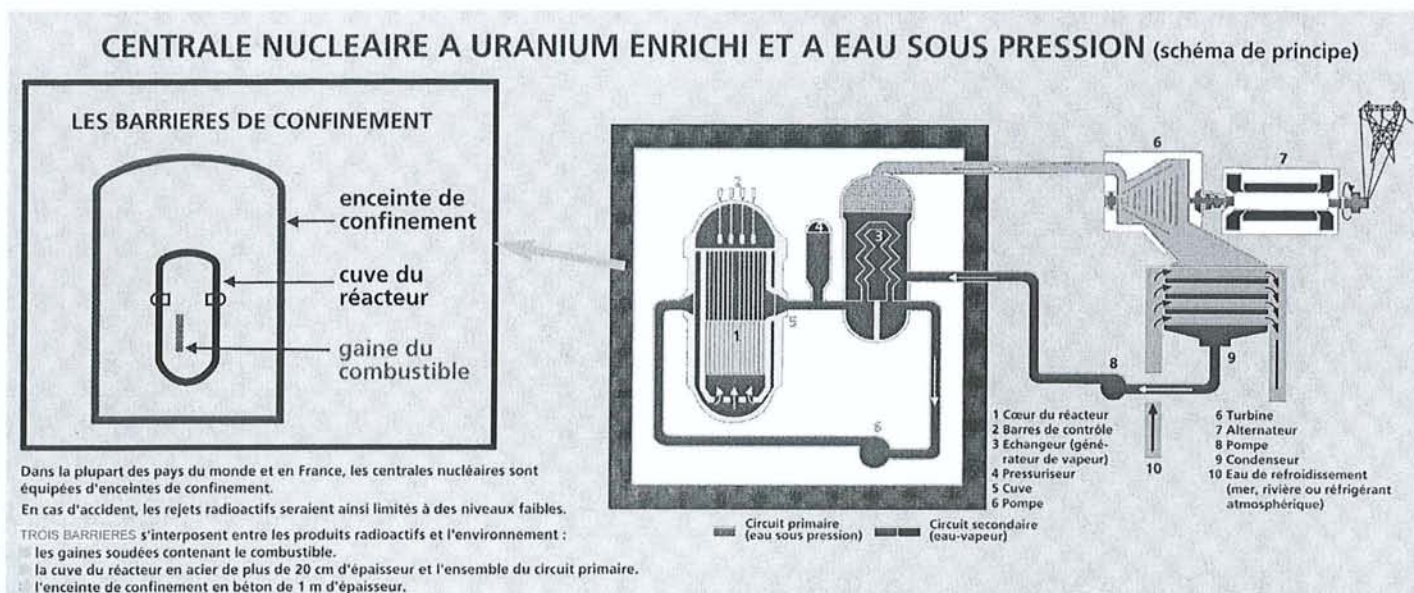
alternateur, producteur d'électricité. Un troisième circuit refroidit la vapeur du circuit précédent.

Le réacteur nucléaire en fonctionnement est le siège de la formation de produits radioactifs, parmi lesquels on distingue :

- les produits de fission, créés par la fission des produits d'Uranium ou d'autres nucléides au sein du combustible ; ce sont essentiellement le Plutonium, le Tritium, le Césium 134 et 137, le Krypton 85, l'Iode 131 et 133, le Strontium 90;
- les produits d'activation, dus à la capture des neutrons émis lors de la fission, par des éléments chimiques stables contenus dans le liquide de refroidissement ainsi que dans les matériaux de structure du réacteur ou du combustible ; c'est principalement sous forme de produits de corrosion (cobalt 58 et 60, manganèse 54, chrome 51, fer 59) qu'on les retrouve en faible quantité dans les effluents liquides.

Pour isoler, aussi rigoureusement que possible, l'environnement des matières radioactives contenues dans le réacteur, 3 barrières successives empêchent leur passage vers l'extérieur :

- une gaine métallique autour du combustible,
- une cuve en acier qui abrite le cœur du réacteur et son circuit de refroidissement,
- une enceinte en béton précontraint qui isole le circuit primaire et le réacteur de l'extérieur.



Source : DOLLO R. Principales unités utilisées en radioprotection. Sources de rayonnements ionisants (48)

Les travailleurs des centrales nucléaires peuvent être exposés au cours de divers travaux de surveillance, de contrôle et d'entretien. Les doses reçues le sont principalement lors de l'arrêt du réacteur au cours des travaux d'entretien et de renouvellement du combustible.

5.3.1. Exposition externe

Le personnel est soumis avant tout à une exposition externe (corps entier) due aux rayonnements gamma (98% des doses reçues ont cette origine).

La dose « neutrons » représente 1 à 2 % du total des doses reçues ; elle est donc beaucoup plus faible et ne concerne qu'un nombre limité de personnes intervenant à titre exceptionnel dans l'enceinte de confinement alors que le réacteur fonctionne à la puissance nominale. Le maniement du combustible pose aussi un « problème neutrons », qu'il s'agisse de combustible irradié ou de certains combustibles neufs (combustible MOX, constitué d'oxyde d'uranium et d'oxyde de plutonium).

Récemment des médecins du travail des centrales ont montré qu'il pouvait y avoir une exposition au niveau des extrémités (doigts, mains) au cours de certaines manipulations ; il faut donc dans ces cas prendre des dispositions pour les mesurer (dosimètres thermoluminescents).

Enfin, il existe un risque de contamination externe. C'est pourquoi à chaque sortie de zone contrôlée, toute personne passe obligatoirement par deux portiques de détection gamma et bêta afin de rechercher une contamination externe et dans une certaine mesure une contamination interne par un radioélément émetteur gamma. La contamination externe est un incident banal et fréquent en centrale nucléaire, comme dans tout endroit où sont manipulés des radioéléments. Il est relativement facile de s'en débarrasser et le personnel infirmier des centrales joue un rôle essentiel à ce propos.

5.3.2. Exposition interne

Il n'y a exposition interne que s'il y a incident ou accident. Elle est donc exceptionnelle (les doses cumulées sont infimes), mais le risque existe cependant.

5.3.3. Conclusion

Pour le personnel EDF, les effectifs sont d'environ 16000 personnes. La dose moyenne est inférieure à 2 mSv, à peine plus d'une centaine dépasse 20 mSv.

Les agents des entreprises extérieures qui interviennent en particulier lors des arrêts de tranche qui durent environ deux mois, sont les plus exposés; ils sont environ 29000. La dose individuelle moyenne annuelle est estimée à 6 mSv et représente plus de 80 % des doses totales reçues dans les centrales nucléaires d'EDF. 20 à 30 % de ces personnels dépassent la limite de 20 mSv par an qui sera la nouvelle limite imposée par la réglementation.

5.4. Risques radiologiques dans les mines d'Uranium (83) (63)

En 1950, furent ouvertes les premières mines d'Uranium en France. La nature exacte des risques radiologiques auxquels étaient exposés les mineurs d'Uranium étaient mal connus.

Actuellement, les mines d'Uranium emploient en France 2300 personnes et sont localisées dans le Limousin, la Vendée et le Languedoc.

5.4.1. Identification des risques radiologiques

Les mineurs d'Uranium subissent l'essentiel de leur exposition aux rayonnements au cours des opérations de routine liées à l'extraction du minerai. Les opérations de maintenance, normalement effectuées dans les zones stériles, sont relativement moins exposantes.

L'exposition de ces travailleurs est d'origine naturelle et se compose d'une exposition externe mais aussi d'une exposition interne. L'Uranium naturel se compose de trois isotopes instables :

- L'Uranium 238 (^{238}U , période égale à $4,5.10^9$ années) représente 99,3% de l'Uranium naturel et a 14 descendants,
- L'Uranium 235 (^{235}U , période égale à $7,1.10^8$ années) a 11 descendants. Il ne représente plus dans les gisements que 0,7 % de l'Uranium naturel en raison de sa période plus courte,
- Le Thorium 232 (^{232}Th , période égale à $1,4.10^{10}$ années) a 11 descendants.

5.4.1.1. Exposition externe

Les mineurs sont essentiellement exposés aux rayonnements issus des 6 radionucléides émetteurs gamma de la chaîne de l' ^{238}U .

Typiquement au centre d'une galerie tracée dans du minerai à une teneur en Uranium de 0,1%, le débit de dose est de l'ordre de $0,5 \mu\text{Gy/h}$ et le risque de dépassement de la limite annuelle (50 mSv) existe dès que la teneur du minerai dépasse 0,5 %. Il n'est pas rare actuellement de mesurer, dans les chantiers aux cours d'exploitations, des débits de dose ambiants compris entre 50 et $200 \mu\text{Gy/h}$.

5.4.1.2. Exposition interne

Le risque provient de l'inhalation d'émetteurs alpha en suspension dans l'atmosphère.

- ◆ Le ^{222}Rn et ses produits de filiation (émetteurs alpha à vie courte), isotope de l' ^{238}U représente le risque radiologique prédominant.

L'inhalation du ^{222}Rn lui-même n'entraîne en général qu'un risque négligeable devant celui qui provient de l'inhalation de ses descendants formés dans l'air. Les ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi se déposent en effet dans les poumons, ainsi que dans les autres tissus de l'organisme (après une faible dissolution dans le sang) et y laissent une large part de leur énergie potentielle de désintégration.

L'exposition des mineurs à des concentrations élevées de ^{222}Rn et de ses descendants a été corrélée avec l'induction de cancers du poumon dans plusieurs groupes de mineurs (mines de

la région de Schneeberg en Allemagne ou de Joachimstal en Tchécoslovaquie) et ces constatations ont été renforcées par la reproduction expérimentale de cancers broncho-pulmonaires chez les rats exposés uniquement à des inhalations de ^{222}Rn et de ses descendants.

◆ Les poussières de minerai (émetteurs alpha à vie longue) : ^{238}U , ^{234}U , ^{230}Th , ^{226}Ra , ^{210}Po

Les atomes inhalés sont susceptibles de se déposer dans les poumons, mais la plus grande partie est éliminée biologiquement avant d'avoir pu se désintégrer et délivrer son énergie. Cependant le risque de contamination peut devenir critique vis-à-vis des limites annuelles dans les chantiers fortement empoussiérés où la teneur du minerai dépasse 0,5 %. Ce risque peut devenir prépondérant dans certains cas comme dans les mines à ciel ouvert des régions à climat sec.

5.4.2. Conclusion

Les mineurs des mines d'uranium sont les travailleurs du nucléaire les plus exposés. Le risque d'exposition interne est une à trois fois plus importante que l'exposition gamma. La dose équivalente annuelle pour les mineurs des mines d'uranium indiquée dans le rapport 1993 de l'UNSCEAR est de 1 à 10 mSv. Elle est en France de 9 mSv.

5.5. Exposition dans les autres étapes du cycle du combustible (61)

La production d'électricité par les centrales nucléaires nécessite une série d'opérations qui commence par l'extraction de l'uranium (chapitre précédent) et se termine par le stockage des déchets radioactifs.

5.5.1. Exposition dans les usines de traitement du minerai

Le risque est également prépondérant dans les usines de traitement de minerai où on retrouve les deux mêmes types de risques d'exposition interne et externe que ceux décrits dans les mines, avec quelques différences selon la phase de traitement dans laquelle travaille le personnel :

- dans la zone de préparation mécanique du minerai, les risques sont semblables à ceux rencontrés lors des opérations d'extractions,
- dans les zones d'attaque chimique du minerai, les risques d'exposition interne du minerai sont très faibles,
- les risques réapparaissent dans les zones de finition du produit, avec essentiellement les problèmes liés aux poussières d'uranate.

Ces risques se rapportent principalement aux opérations d'entretien et de maintenance du matériel de production. Ainsi, l'expérience a montré que le risque d'exposition du personnel des usines à des doses élevées en des temps courts était réel si des dispositions particulières

n'étaient pas prises avant les interventions, lors de l'entretien des cuves d'attaque ou de colonnes de résines notamment.

5.5.2. Enrichissement de l'uranium

La méthode la plus utilisée est la séparation isotopique par diffusion gazeuse qui assure les deux tiers de la production mondiale en Uranium enrichi. Elle est mise en place en France et aux Etats-Unis.

5.5.3. Fabrication du combustible

L'Uranium est compacté en petites pastilles qui sont empilées dans des tubes parfaitement étanches appelés crayons. Ces assemblages de combustibles restent dans le cœur du réacteur d'une centrale nucléaire entre 3 et 4 ans. Les assemblages sont renouvelés par tiers ou par quart tous les ans lors de l'arrêt de la centrale.

5.5.4. Retraitement des combustibles usés

Il consiste à séparer d'une part l'Uranium et le Plutonium qui seront réutilisables et d'autre part les produits de fission qui n'ont plus d'utilité et sont fortement radioactifs. Ces derniers représentent 3 % des matières du combustible usé et sont stockés dans une cuve pendant un an en vue d'un stockage définitif.

Trois risques sont à prendre en compte :

- le risque d'irradiation externe par les rayonnements bêta et gamma des produits de fission,
- le risque de contamination par les émetteurs alpha et principalement le Plutonium,
- le risque d'exposition externe aux neutrons et aux rayons gamma émis lors d'un accident de criticité qui rend possible la présence d'isotopes fissiles de l'Uranium et du Plutonium.

5.5.5. Stockage des déchets radioactifs

Le but est d'isoler ces déchets de l'environnement afin d'éviter toute dispersion de radioactivité dans le milieu extérieur.

5.5.6. Le démantèlement des installations

Une installation arrêtée définitivement doit être déclassée et démantelée. Les techniques de démantèlement sont actuellement au point et ont déjà été utilisées.

5.5.7. Transports des matières radioactives

Selon une étude réalisée par l'IPSN (Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire) et l'OPRI (Office de Protection contre les Rayonnements Ionisants) en janvier 1999, les doses reçues

par les agents s'occupant de transport d'uranium étaient négligeables, de l'ordre 0,3 mSv. L'agent le plus exposé était celui qui préparait le convoi (72).

5.5.8. Conclusion

Les travailleurs sont exposés à des niveaux de dose non significatifs, inférieur à 5 mSv par an.

5.6. Exposition dans les laboratoires

Les radioéléments sont utilisés sous forme de sources non scellées dans :

- les laboratoires de radioanalyse
- la recherche biomédicale

Cette exposition concerne 16000 personnes (40).

5.6.1. Laboratoires de radioanalyse (91)

Ils sont généralement associés à un service de médecine nucléaire. Les analyses de biologie sont effectuées in vitro sur des prélèvements biologiques dans un but diagnostique. Ces applications permettent d'effectuer des dosages sur des échantillons, afin de déterminer les valeurs des paramètres biologiques, en utilisant des radionucléides. Les techniques de radioanalyse, améliorées par le développement des anticorps monoclonaux, permettent de doser facilement des substances d'intérêt biologique telles que les vitamines, les enzymes, les toxines, les marqueurs tumoraux... Ils n'exigent pas l'administration d'un radiopharmaceutique au malade et ne présentent donc aucune contre-indication. Les radioanalyses sont surtout utilisées lorsque les techniques conventionnelles de dosage ne peuvent être appliquées. Les principaux radionucléides utilisés sont le tritium, le phosphore 32, l'iode 125...

5.6.2. Recherche biomédicale (91)

Les propriétés des radionucléides sont utilisés pour des études pharmacocinétique, des études de métabolisme pour le marquage de molécules (protéines, ADN, cellules...), pour des dosages radioimmunologiques. Les expérimentations sont réalisées in vivo chez l'animal ou in vitro sur des cellules ou des tissus. Les radionucléides utilisés sont parfois à période radioactive longue : parmi les plus utilisés, figurent le Tritium et le Carbone 14. Cependant, des radionucléides à période courte sont également utilisés selon le type de recherche effectuée : le Phosphore 32 en oncologie, le Phosphore 33, le Soufre 35 pour des études de biologie moléculaire ou de génétique ou encore l'Iode 125 en endocrinologie ou pour des dosages biologiques.

5.6.3. En conclusion

L'utilisation des sources non scellées implique pour le personnel des risques d'exposition externe et d'exposition interne liée à une contamination radioactive potentielle. En pratique dans les conditions normales de travail, l'exposition des travailleurs est faible.

5.7. Autres expositions professionnelles (61)

5.7.1. Exposition professionnelle lors des vols à haute altitude et des vols spatiaux

Les doses reçues par le personnel navigant pendant les vols long-courriers dépendent de l'altitude, de la latitude et de la durée du vol. Pour les vols supersoniques, le débit de dose est trois à quatre fois supérieur que pour un vol subsonique. Pour les équipages effectuant 600 heures de vol par an, l'exposition professionnelle se situe entre 2 à 3 mSv par an selon le rapport de l'UNSCEAR de 1993 (avec des valeurs plus élevées pour les vols supersoniques). Les valeurs restent donc bien inférieures aux normes recommandées actuelles (94).

Concernant les vols spatiaux, les radiations extra-terrestres sont un risque réel. Il faut opposer les vols courts prévus dans des périodes de calme solaire et les séjours prolongés dans l'espace. Dans cette dernière situation, les irradiations peuvent atteindre des niveaux élevés de l'ordre de 50 mSv pour des missions de 12 mois. On connaît deux observations humaines de cataracte (Tobias) et de dépigmentation cutanée (Simons). On ne peut également exclure les risques biologiques à long terme (94).

5.7.2. Exposition professionnelle dans le domaine militaire

Les moteurs équipant les gros bâtiments de surface type porte-avions nucléaires ou les sous-marins nucléaires utilisent du combustible enrichi. Les risques sont ceux d'une irradiation par neutrons et rayonnements gamma résultant du fonctionnement du réacteur. Les doses reçues par les équipages sont celles des travailleurs nucléaires, donc très faible en service courant. Mais, il peut se produire des incidents ou accidents à bord avec fuite possible des radioéléments. Une protection individuelle de chaque membre s'avère donc utile. Il existe également des risques lors des interventions d'entretiens au niveau des réacteurs.

5.7.3. Exposition dans les mines non uranifères

Le risque radiologique dû aux radionucléides naturels ne se rencontre pas uniquement dans les mines d'uranium mais également dans les mines de substances non radioactives et de façon générale dans toute entreprise qui offre du travail en sous-sol (creusements de tunnel, de réservoirs souterrains, du métro, des parkings, exploitation de champignonnières...). En France, à peu près tout le personnel des mines non uranifères reçoit une doses équivalente moyenne inférieure à 15 mSv par an.

5.8. Au total

Un bilan des expositions professionnelles aux rayonnements ionisants a été réalisé en France sur la période allant de 1995 à 1999 par l'IRSN (Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaires) et le SPRA (Service de Protection Radiologique des Armées).

Il montre une réduction sensible, principalement due aux efforts menés par l'industrie nucléaire. Il existe une forte réduction des effectifs des travailleurs exposés à des doses de plus de 20 mSv, en particulier dans l'exploitation et la maintenance des réacteurs de puissance. Cependant, les usages médicaux ainsi que l'industrie non nucléaire génèrent plus de doses que les exploitants du cycle électronucléaire. Ils sont également encore à l'origine de doses individuelles élevées. Il s'avère donc nécessaire de continuer à progresser dans le domaine de la radioprotection (40).

6. Observations cliniques

6. Observations cliniques

6.1. Observation n°1

Il s'agit d'un patient, âgé de 79 ans, présentant des lésions de radiodermite chronique qui a été diagnostiquée vers 1970.

Sur le plan fonctionnel, le patient se plaint de dysesthésies au niveau de la partie distale des doigts prédominant au niveau de l'index droit. Ces troubles le gênent particulièrement pendant la période hivernale. La mobilité articulaire est conservée.

Sur le plan clinique, la peau présente un aspect poïkilodermique et aminci. Les ongles sont épaissis, cassants et parcourus de mélanochynies longitudinales plus particulièrement nettes au niveau du deuxième doigt de la main droite.

Sont apparues lors de la dernière consultation des lésions kératosiques dont deux apparaissaient suspectes, l'une au niveau de l'index gauche qui a été électrocoagulée et la deuxième plus importante au niveau de la deuxième phalange du médius droit qui pouvait faire évoquer un carcinome spino-cellulaire.

La biopsie de la lésion du médius droit ne montrait pas d'atypie cellulaire. Une exérèse de cette lésion a été réalisée ainsi qu'une greffe cutanée permettant une cicatrisation rapide. L'examen anatomo-pathologique a confirmé l'absence de pathologie tumorale.

Sur le plan professionnel,

- il était chirurgien-orthopédiste de 1954 à 1973. Il effectuait des réductions de fractures sous scopie avec une fréquence de 5 à 6 par jour. Il réduisait différents types de fractures sous scopie allant de la phalange qui durait environ 1 minute jusqu'au col du fémur qui pouvait durer jusqu'à 45 minutes. Pendant ces activités, il n'utilisait un tablier plombé que de façon occasionnelle et ne prenait jamais de gant plombé. Il ne portait pas de dosimètre.
- Puis, il a changé d'activité en 1973 en raison de l'apparition des lésions de radiodermite et est devenu gynécologue obstétricien ; il a exercé jusqu'en 1991, date à laquelle il a pris sa retraite.

Il a effectué une déclaration de maladie professionnelle qui a été reconnue avec un taux d'IPP de 59 %.



Photo n° 1



Photo n° 2

6.2. Observation n°2

Un homme, âgé de 57 ans, chirurgien-dentiste, consulte pour une dermatose de la main droite.

Cette dermatose est apparue il y a une dizaine d'années, débutant au niveau de l'extrémité du pouce. Puis elle s'est progressivement étendue pour atteindre les deuxième et troisième doigts de la main droite.

A l'examen clinique :

- On note une dermatose intéressant les trois premiers doigts de la main droite. Il s'agit d'une dermatose hyperkératosique touchant les extrémités des trois doigts avec une atteinte unguéale. Il existe un aspect scléreux par endroit, érythémateux avec présence de télangiectasies. L'aspect clinique est compatible avec une radiodermite chronique.
- Il existe également une ulcération à la pliure entre la première et la deuxième phalange de l'index droit qui est suspecte. Une biopsie cutanée de cette ulcération a été réalisée, mettant en évidence un carcinome épidermoïde très bien différencié.
- Au niveau de la main gauche, on note la présence de deux lésions kératosiques sur les deuxième et troisième doigts.

Une intervention chirurgicale est prévue pour le carcinome épidermoïde de découverte récente. Par ailleurs, une surveillance de la radiodermite chronique est à effectuer tous les 6 mois pour traiter un éventuel carcinome dès son apparition, soit par électrocoagulation, soit par chirurgie.

Sur le plan professionnel, le patient est chirurgien-dentiste depuis 1970. Il travaille dans son cabinet depuis cette date.

Lors de ses soins dentaires, il était amené à effectuer régulièrement des clichés rétro-alvéolaires. Il effectuait en moyenne 15 à 20 radiographies par jour. Pour cela, il tenait la radiographie entre le pouce et l'index au niveau de la bouche du patient et il dirigeait l'appareil de radiographie en direction du cliché. Occasionnellement, il tenait la radiographie de la main gauche. Il n'utilisait aucune protection adéquate. Les clichés radiologiques effectués duraient 0,26 secondes avec une dose d'irradiation de 0,42 mSv.

Depuis la découverte du diagnostic en novembre 2002, il place la radiographie à l'extrémité d'une pince longue d'une dizaine de centimètres qu'il tient de la main droite.

Il n'a pas effectué de déclaration de maladie professionnelle au titre du tableau n°6.



Photo n°3



Photo n°4



Photo n°5

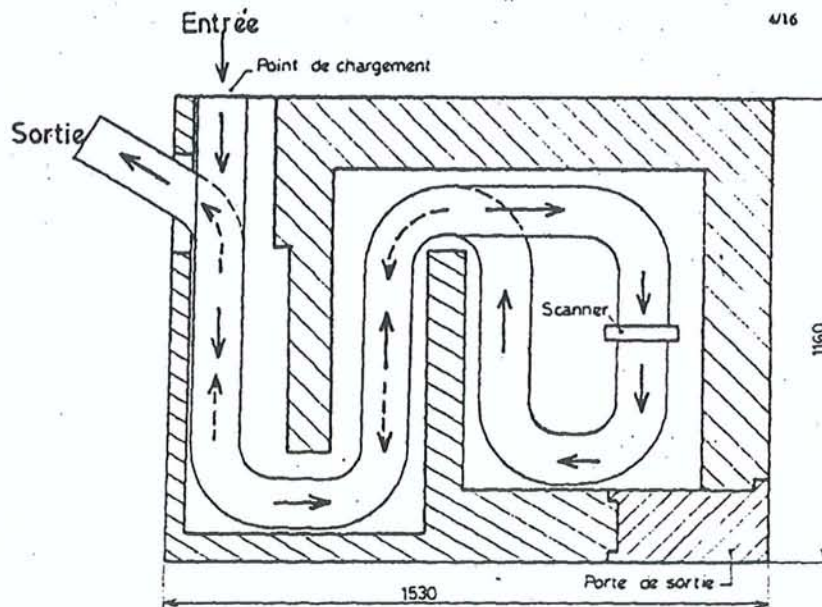
6.3. Observations n°3, 4 et 5

Il s'agit de 3 cas accidentels venant d'une même entreprise à Forbach en août 1991.

- Observation n°3:

Un salarié de 27 ans a été employé le 6 août 1991 en tant que manutentionnaire dans une entreprise traitant des copeaux de polytétrafluoro-éthylène ou téflon par polymérisation.

Son poste de travail consistait à recevoir des fûts de matière première (copeaux ou poudre de polytétrafluoro-éthylène) et à répartir cette dernière sur des plateaux avant que ceux-ci ne passent, grâce à un convoyeur à bande, dans un accélérateur de particules installé dans une salle bétonnée dans laquelle l'accès normal devait se faire par une porte munie d'un système de sécurité ne permettant son ouverture que lors de l'arrêt complet de l'appareil.



Plan de la salle d'irradiation et de ses accès

Pendant la période du 6 au 19 août, le salarié aurait été amené à pénétrer plusieurs fois par jour dans cette enceinte afin de remédier aux incidents qui pouvaient y survenir. Lors d'une intervention, il a essayé de remédier à une panne du système d'aération de l'accélérateur linéaire d'électrons. Lors des interventions, le salarié entrait à l'intérieur de la cellule d'irradiation par l'intermédiaire de la fenêtre de sortie du convoyeur à bande et non pas par la porte munie du système de sécurité prévue initialement. L'intensité étant seule coupée, alors que la haute tension était maintenue pour gagner du temps, il persistait un courant résiduel de quelques microampères et l'accélérateur continuait à dégager un faisceau de rayonnement bêta. Le courant était suffisant pour que le débit de dose des électrons de haute énergie (1,7 MeV) atteigne plusieurs dizaines de grays par minute. En effectuant ces travaux pour lesquels

il n'avait aucune formation de radioprotection, il opérait en passant les mains, la tête et le tronc sous le scanner.

Lors de ces interventions, il a été exposé à une dose d'irradiation estimée à 40 Sv selon le dosimètre.

Dès le 3^{ème} ou 4^{ème} jour, le salarié commençait à présenter des dysesthésies du cuir chevelu associé à une chute de cheveux. Puis, sont apparus rapidement un œdème et un erythème de la face dorsale de la main droite associés à des lésions bulleuses des doigts se compliquant d'une impotence fonctionnelle. Le salarié fut amené à interrompre son travail le 19 août ; débutaient alors les mêmes manifestations pathologiques au niveau de la main controlatérale. Après avis spécialisé, le diagnostic de radiodermite aiguë était posé.

Il fut rapidement hospitalisé. Les lésions tégumentaires se répandirent rapidement au niveau de la tête, des membres supérieurs, du tronc et de la cuisse droite pour atteindre une surface corporelle estimée à 52 %. De façon concomitante, apparaissait un syndrome septique, une détresse respiratoire et des troubles de la vigilance. Mi-septembre 1991, de nouvelles plages de radionécrose apparaissaient au niveau de la jambe gauche, tandis que l'impotence fonctionnelle des mains s'aggravait avec atteinte tendineuse. Il eut un traitement adapté, notamment de multiples greffes et une rééducation active en raison de l'enraidissement de ces articulations.

Il eut de multiples interventions avec greffes cutanées compliquées de lyse et de nécrose, exérèse de brides rétractiles du coude gauche, amputation de l'index gauche sur ostéite. Son état a été finalement considéré consolidé le 30 avril 1994. En 1996, il subit l'amputation des quatre derniers doigts de la main droite et de l'annulaire gauche.

Les séquelles en 1996 étaient des douleurs affectant les différents zones greffées ainsi que de multiples stigmates sur le plan cutané recouvrant la quasi-totalité du corps et une alopécie complète. Sur le plan fonctionnel, il présentait un important déficit articulaire avec ankylose du coude droit, une raideur des deux poignets et une flexion difficile du genou gauche.

Il a été reconnu en maladie professionnelle au titre du tableau n°6 du régime général avec un taux d'IPP de 98 %.

- Observation n°4 :

Le deuxième salarié concerné, âgé de 23 ans, exerçait la même fonction de manutentionnaire dans l'entreprise et a été exposé dans la période du 2 août au 19 août 1991. Il aurait été également amené à pénétrer plusieurs fois par jour afin de remédier aux incidents qui pouvaient y survenir.

La dose d'irradiation reçue a été estimée à 9 Sv.

Le 13 août, après un séjour d'un quart d'heure environ dans la salle bétonnée, il ressentit à la sortie des dysesthésies du cuir chevelu puis apparut une perte de cheveu et des troubles de la pigmentation de la face. Le diagnostic de radiodermite aiguë fut posé après avis spécialisé le 23 août. Les atteintes tégumentaires s'étendirent sur les membres supérieurs et le tronc pour atteindre 20 % de la surface corporelle. Il fut hospitalisé et traité par soins locaux et greffons cutanés. La rééducation fonctionnelle de l'épaule droite, siège d'un syndrome algodystrophique fut débuté tandis que l'épaule gauche était atteinte à un moindre degré. Une atteinte séminale initiale avec oligospermie majeure et asthénospermie avait été constatée. Par ailleurs, il présentait une névrose post-traumatique justifiant la mise en route d'une psychothérapie. Son état a été considéré consolidé en décembre 1994.

En 1995, il persistait des douleurs des deux épaules et du membre supérieur droit, des dysesthésies des deux mains, des céphalées et des troubles du sommeil. Il existait également de larges plages remaniées sur le cuir chevelu, siège d'une alopecie quasi-totale, sur les épaules, le tiers supérieur du dos et les deux bras. Il était noté des troubles de la pigmentation cutanée sur le visage avec une induration du pavillon de l'oreille droite. Il existait également un petit enraidissement de l'épaule droite.

Il a effectué une déclaration de maladie professionnelle au titre du tableau n° 6 et a été reconnu avec un taux d'IPP de 40 %.

- Observation n°5 :

Le troisième salarié était âgé de 34 ans lorsqu'il a été embauché par l'entreprise en tant qu'ouvrier de production au début du mois de juillet 1991. Il était spécialement chargé de contrôler le bon fonctionnement de toute l'installation de l'entreprise et notamment de l'accélérateur de particules où étaient traités les copeaux de polytétrafluoro-éthylène. Il reçut le 2 et 3 juillet une formation préalable à la conduite de l'accélérateur.

Dès les premiers jours de son arrivée, il était amené à pénétrer dans la cellule d'irradiation tandis que l'accélérateur de particules était sous tension. Selon l'enquête, le salarié était entré un mois auparavant dans l'installation pour éteindre un feu qui avait pris naissance dans un bac rempli de matière plastique bloqué accidentellement sous le scanner. La source avait été coupée, mais la haute tension maintenue. Le dosimètre qui avait enregistré 150 mSv n'a pas été envoyé en lecture en laboratoire. Cette exposition est passée inaperçue et n'a donc pas été déclarée aux autorités compétentes.

Il a reçu un équivalent de dose moindre par rapport à ses collègues et localisé au niveau des bras et des avants-bras.

Il fut hospitalisé le 9 septembre 1991 alors que se développait une alopecie, des zones d'hyperpigmentation cutanée au niveau du front, la partie supérieure de la face antérieure du thorax et un moindre degré à l'avant-bras gauche. Il a présenté par ailleurs une anxiété réactionnelle. Son état fut considéré consolidé en janvier 1992.

En 1997, il persistait des plages d'hyperchromie rougeâtre affectant le membre supérieur droit associé à des manifestations de prurit lors de l'exposition à la chaleur.

Il fit une déclaration de maladie professionnelle au titre du tableau n° 6 qui fut reconnue avec un taux d'I.P.P. de 5 %.

6.4. Observation n°6

Une femme de 76 ans présente en novembre 2000 des troubles digestifs à type de diarrhée et de douleurs de l'hypochondre gauche. Ces symptômes sont révélateurs d'un infarctus splénique se compliquant d'une rupture de la rate. La patiente subit une splénectomie en urgence.

L'étude histologique de la pièce opératoire permet le diagnostic de lymphome leucémique de phénotype B de type Burkitt, de stade IV avec une atteinte hépatique concomitante.

L'hémogramme met en évidence une anémie à 7,2 g/dl, une thrombopénie à 100000 par mm³ et une hyperleucocytose à 20000 par mm³ avec 20 % de blastes circulants.

Le myelogramme montre un envahissement médullaire avec 34 % de cellules atypiques.

La biopsie ostéo-médullaire met en évidence une infiltration médullaire modérée à marquée (40 %) par le lymphome non hodgkinien B de type Burkitt.

Le caryotype ne met pas en évidence de translocation t(8;14), t(2;8) ou t(2;22).

La sérologie Epstein-Barr-Virus est positive pour les IgG et la sérologie HIV est négative.

Il existe par ailleurs une augmentation des LDH à 400 UI/l et un syndrome inflammatoire avec une PCR à 147 mg/l.

Le reste du bilan d'extension est négatif. Il n'y a pas d'atteinte méningée et le scanner corps entier montre l'absence d'autre localisation tumorale.

Une chimiothérapie a été débutée dans les suites de l'intervention chirurgicale permettant une rémission complète.

En juillet 2001, la patiente présente une récurrence du lymphome de Burkitt avec une atteinte pleurale associant un fébricule à 38,2°C, une asthénie importante, des œdèmes des membres inférieurs avec une prise de poids de 7 kg. Il existe par ailleurs des adénopathies périphériques : sus-claviculaires gauches, sous-mandibulaires et inguinales bilatérales. Le scanner montre la présence de polyadénopathies médiastinales et abdominales et confirme l'épanchement pleural bilatéral. Elle est traitée par une nouvelle chimiothérapie mais présente une dégradation rapide de son état clinique avec une rechute méningée du LMNH aboutissant à son décès le 15 octobre 2001.

Sur le plan professionnel :

- ◆ la patiente a obtenu son diplôme d'infirmière en 1946 et a débuté sa carrière dans un service de radiothérapie d'une clinique.
- ◆ la patiente a intégré en 1948 un service de radiothérapie dans un centre anti-cancéreux où elle a effectué de la radiothérapie externe : les malades étaient traités par rayons X à l'intérieure d'une chambre plombée, la patiente se trouvait à l'extérieur de la chambre plombée lors de l'émission des rayons X.
- ◆ Puis, elle a travaillé dans un service de curiethérapie de mars 1961 jusqu'à décembre 1982.
 - De 1961 à 1973, elle manipulait des gaines de platine contenant du Radium avec des pinces. Elle plaçait les tubes de Radium au niveau du col utérin ; ces derniers étaient laissés en place pendant 4 à 6 jours. Elle manipulait également des aiguilles de platine

contenant du Radium pour traiter les cancers ORL et cutané. Pour cela, elle devait mettre un fil à l'extrémité de l'aiguille à l'aide de pinces qu'elle attachait au niveau de la langue (jusqu'à 6-7 aiguilles) ou de la peau qui étaient laissées en place plusieurs jours.

Elle ne portait aucune protection (pas de gants ou de tablier plombé) lors des manipulations. De plus, pendant le séjour où le Radium était laissé en place, le personnel entraînait dans la chambre du malade sans aucune protection.

- De 1974 à 1982, elle manipulait des fils d'Iridium 192 qu'elle coupait et mettait dans des tubes en plastique à l'aide de pinces, sans gant ni tablier plombé. Il y avait un mur plombé au niveau de la paillasse mais celui-ci ne protégeait pas les bras ni le haut du corps. La patiente devait effectuer les manipulations en mettant les bras sur les côtés du mur plombé. La source n'était introduite qu'au dernier moment auprès du malade. Parallèlement, la manipulation de Césium 137 s'est développée avec utilisation de projecteur de source.

Il faut savoir que le Césium et l'Iridium sont apparus dans le service au début de l'année 1972 mais ayant un nombre de sources et de projecteurs de source insuffisants, l'utilisation du Radium a continué jusqu'à novembre 1974.

Les premières mesures dosimétriques ont débuté en 1970 et nous les avons relevées dans le tableau suivant :

Année	Activité	Dosimétrie poitrine en mSv	Dosimétrie poignet en mSv
1970 (11 mois)	Curiethérapie Manipulation de radium	33,20	
1971		43,80	
1972		30,80	
1973	Curiethérapie Manipulation d'iridium et de Césium	16,30	
1974		11,80	
1975 (11 mois)		5,10	
1976		3,85	
1977		4,15	21,90
1978		2,60	34,65
1979		1,40	25,30
1980 (8 mois)		1,95	21,80
1981 (5 mois)			16,95

Une déclaration de maladie professionnelle a été effectuée par la patiente en janvier 2001 et a été reconnue au titre du tableau n°6.

6.5. Observation n°7

Une patiente de 55 ans se présente dans le service de pneumologie suite à la découverte d'un hippocratisme digital par son médecin du travail.

Dans ses antécédents, on note une thyroïdectomie partielle en 1984 pour un nodule froid, la rupture d'un kyste ovarien nécessitant une hystérectomie totale en 1989. Elle présente un tabagisme à 16 paquets-années interrompu il y a plus de 20 ans. Elle a consommé en moyenne un paquet par jour de l'âge de 18 ans à 34 ans.

Un bilan complet a été réalisé, mettant en évidence une opacité lobaire supérieure gauche sous hilare et hilare gauche avec des localisations secondaires nodulaires controlatérales au niveau du cliché thoracique.

Le scanner thoracique confirme la localisation de la tumeur et montre la présence de petits ganglions le long de la portion ascendante de l'aorte ainsi que de la fenêtre aortico-pulmonaire. Il existe des lésions d'allure métastatiques nodulaires centimétriques et infra-centimétriques dont certaines ont un aspect excavé.

Les biopsies bronchiques réalisées lors de la fibroscopie bronchique sont négatives.

Une biopsie transpariétale avec étude histologique est réalisée, mettant en évidence un adénocarcinome bien différencié primitif lingulaire classé T2N2M1 (nodules pulmonaires controlatéraux).

Le bilan d'extension ne montre pas de lésion métastatique hépatique, surrénalienne, osseuse ou cérébrale.

Une chimiothérapie a été débutée avec 6 cures de Carboplatine-Taxol puis Carboplatine-Gemzar. Malgré le traitement, la maladie est en progression. Une nouvelle chimiothérapie par Navelbine a été débutée et est en cours.

Sur la plan professionnel,

- Elle est tout d'abord technicienne dans un laboratoire de recherche chirurgicale où elle effectue la préparation et la stérilisation du matériel chirurgical. Elle s'occupe également de l'anesthésie des animaux.
- De 1971 à 1989, elle est embauchée en tant qu'ingénieur de recherche par le laboratoire de recherche chirurgicale où elle travaille avec les chirurgiens, en particulier les orthopédistes. Ces derniers effectuent des réductions de fractures et traitent les pertes de substances chez les animaux. Ils sont amenés à effectuer de façon pluri-hebdomadaire des scopies ainsi que des radiographies pendant lesquelles la patiente doit tenir l'animal sans aucune protection, elle ne porte ni tablier ni gant plombé. Pendant cette période, il n'y a pas eu de dosimétrie effectuée.
- De 1989 à 1995, elle s'occupe de la chirurgie des petits animaux.
- De 1995 à septembre 2002, elle change de laboratoire où elle effectue de la recherche dans les biomatériaux (cartilages), culture cellulaire, prélèvement sur des animaux. Elle

effectue également de la chimie analytique. Pendant ces activités, elle manipule du Soufre 35, de la Thymidine tritiée et du Chrome 51 de façon occasionnelle. Elle porte des gants ainsi qu'une blouse. Les résultats de la dosimétrie sont négatifs.

7. Revue de la littérature - Discussion

7. Revue de la littérature - Discussion

Dans ce chapitre, nous allons reprendre les principaux éléments de la littérature qui se rapportent aux sept cas cliniques présentés dans le chapitre précédent. Ces observations peuvent se répertorier dans quatre parties :

- radiodermites chroniques et cancers cutanés,
- radiodermites aiguës,
- lymphome non hodgkinien,
- cancer du poumon.

7.1. Radiodermites chroniques et cancers cutanés

Pour commencer, les principales caractéristiques de la radiodermite chronique vont être présentées, puis un bref rappel historique sur les premiers cas rapportés sera réalisé. Nous nous intéresserons alors plus particulièrement aux radiodermites survenant en radiologie interventionnelle se rapportant au cas clinique du chirurgien-orthopédiste. Les cas de pathologies radio-induites chez les chirurgiens-dentistes seront enfin rapportées.

7.1.1. La pathologie

Les rayonnements ionisants sont susceptibles de donner des lésions de radiodermite chronique (décrite dans le chapitre 4). Sur le plan professionnel, les lésions siègent en général sur les mains avec un amincissement du revêtement cutané et une fissuration des ongles. L'évolution se poursuit par des télangiectasies et des hyperkératoses d'aspect verruqueux. Ce sont les lésions vasculaires qui jouent un rôle primordial dans la pathogénie des lésions chroniques.

La radiodermite chronique est mise en évidence pour des expositions répétées aux rayonnements X de 5 mSv par jour avec une dose cumulée à la peau supérieure à 10 grays. Elle évolue pour son propre compte à partir d'une dose donnée, alors même que toute nouvelle exposition a disparu. Ceci s'explique par la saturation des mécanismes de réparation de l'ADN. Il existe cependant une forte variabilité individuelle (8).

Le risque majeur des radiodermites chroniques réside dans l'apparition de pathologies cancéreuses sur les lésions :

- l'épithélioma spino-cellulaire est le plus fréquent, il survient en moyenne avec un temps de latence de 25 ans. Il apparaît pour des doses supérieures ou égales à 15 grays. Il est de mauvais pronostic car il risque de donner des métastases ou de récidiver.
- Les carcinomes baso-cellulaires surviennent sur les lésions de radiodermite mais ils sont moins fréquents. Ils sont de meilleur pronostic.
- Peuvent apparaître des sarcomes plus rarement.
- De très rares cas de mélanomes ou de cancers des glandes sébacées ou sudorales sont signalés par Adams (64).
- Le potentiel de dégénérescence est difficile à chiffrer, car les épithéliomas n'apparaissent qu'avec une latence de plusieurs dizaines d'années avec une moyenne de 25 à 30 ans. Les

observations de cancérisation sur radiodermite correspondent presque toutes de façon certaine à des doses supérieures aux doses maximales admissibles (500 mSv par an sur les mains, avant-bras, pieds et chevilles) (64). Dans une étude de 1970 réalisée sur 96 patients porteurs de radiodermite chronique, 51 personnes étaient porteuses d'épithéliomas et une de sarcome (76).

7.1.2. Premières observations rapportées

Le premier cas de radiodermite a été rapporté par Oudin (68) deux ans après la découverte des rayons X par Roentgen. Celle-ci est survenue en 1897 chez un physicien.

Le premier cas de cancer cutané secondaire aux rayonnements ionisants a été rapporté par Frieben (31) en 1902 en Allemagne. Depuis ces premières découvertes, des milliers de personnes ont été touchées et des centaines sont décédées des cancers cutanés secondaires aux rayons X. Dans les années 1940-1950, les cas rapportés restent relativement fréquents en particulier chez les physiciens (68).

Dans une étude réalisée par Shattuk en 1964 (68), 39 patients ont été traités pour radiodermite des mains ou pathologie cancéreuse de 1945 à 1960 au Duke University Medical Center. Parmi ces patients, les professions les plus exposées étaient les physiciens avec une large majorité (14 cas), les dentistes (4 cas) et les vétérinaires (2 cas). L'exposition était essentiellement secondaire à la négligence dans l'utilisation des équipements de protection. Près de la moitié des patients a été exposée aux rayonnements pendant une période de quatre ans ou plus. Un tiers a développé des pathologies cancéreuses, en particulier épithéliomas spino-cellulaires.

7.1.3. Observations rapportées en radiologie interventionnelle et discussion

7.1.3.1. Observations de la littérature

Les radiodermites chroniques étaient fréquentes dans les années 1960-1970 en raison de l'utilisation importante de techniques de scopie par les chirurgiens et les généralistes pour réduire les fractures, rechercher les corps étrangers...

En 1972, Roseau (101) recense 98 cas opérés pour radiodermite d'origine professionnelle. Les professions principalement concernées sont les chirurgiens au nombre de 34, 7 orthopédistes, 27 généralistes, 6 phthisiologues, 2 vétérinaires, 6 ingénieurs, 2 infirmières et 10 radiologues. L'auteur insiste sur l'importance de la formation des utilisateurs sur les effets des rayonnements ionisants.

Puis on a assisté à une diminution considérable du nombre de cas de radiodermites en raison de la diminution de l'utilisation des radioscopies et de l'amélioration de la radioprotection.

Le développement des techniques d'imagerie dite interventionnelle, en raison de la priorité donnée au malade dans la démarche diagnostique et thérapeutique, engendre une augmentation considérable des expositions radiologiques des mains des opérateurs. Ceci entraîne une augmentation du risque de développer des pathologies dose-dépendantes, en

l'occurrence cutanées. Il faut donc s'attendre à la réapparition des radiodermes chroniques chez les médecins (7).

Les personnels concernés sont les radiologues, les cardiologues et les chirurgiens orthopédistes, viscéraux, urologues. Il constitue le groupe professionnel le plus exposé aux rayonnements ionisants dans le domaine médical (8).

De nombreux travaux ont été publiés sur le niveau d'irradiation des organes les plus exposés lors des procédures utilisant la radioscopie. Ils concernent l'exposition des mains, du cristallin et de la thyroïde. D'après les données, on constate que l'exposition des extrémités est la plus élevée (9).

A titre d'exemple, pour l'enclouage médullaire, une étude (89) de dosimétrie des poignets estime la dose moyenne par examen à 1,2 mSv, ce qui limite le nombre d'examens à 400 par an ou 8 par semaine si on se rapporte à la limite annuelle (500 mSv par an pour les extrémités). Le temps de scopie durant ces procédures est en moyenne de 4,6 minutes. Pour le drainage biliaire et urologique, deux études (7) incluant des drainages biliaires, des cholangiographies et des néphrostomies donnent des chiffres compris entre 1,5 et 30 mSv par procédure (moyenne de 4 mSv). Rapporté à la limite annuelle de 500 mSv, ces pratiques permettront environ 120 interventions radioguidées par an soit 2 à 3 par semaine.

D'après le réseau national des centres de pathologies professionnelles (30 services dans les CHU français), six observations récentes ont été recensées en radiologie interventionnelle (7) :

- Un radiologue, né en 1945, salarié à temps partiel et exerçant également en cabinet libéral, pratiquait la radiologie interventionnelle depuis vingt ans. De 1978 à 1998, il a effectué environ 170 sacco-radiculographies lombaires par an et une trentaine de myélographies cervicales et dorsales, ainsi qu'environ 250 discographies avec chimionucléolyse par an.
La dermite chronique est apparue en 1998. Le diagnostic a été établi en 1999 par une biopsie cutanée de l'index droit qui mettait en évidence une hyperkératose de Bowen. La capillaroscopie mettait en évidence des lésions caractéristiques d'une exposition chronique aux rayons X.
Le matériel utilisé était un amplificateur de brillance. Les moyens de protection individuelle se résumaient au port d'un tablier plombé. Les gants plombés ont été rapidement abandonnés. Les essais de dosimétrie poignet et de dosimétrie sur table n'ont pas enregistré de dose de radiation (8).
- Un chirurgien généraliste, praticien hospitalier, a exercé pendant 30 ans. Il a présenté une radiodermite chronique et a été mis en congé de longue durée.
- Un chirurgien viscéral de 20 ans d'ancienneté a été reconnu en maladie professionnelle indemnisable pour une radiodermite avec une IPP de 20 %.
- Deux médecins généralistes ayant pratiqué des scopies X ont également présenté une radiodermite.
- Un manipulateur de radiologie en gastro-entérologie a été reconnu en maladie professionnelle indemnisable avec un taux d'IPP de 45 %.

7.1.3.2. Moyens de prévention en radiologie interventionnelle

Les grands principes de radioprotection reposent sur des critères de justification des pratiques, d'optimisation des procédures et de limitation des doses d'exposition.

Les mesures de prévention technique reposent sur l'organisation du travail (limitation du temps d'exposition), sur le principe de zonage (éloignement de la source) et sur l'utilisation d'écrans plombés.

L'utilisation systématique de tabliers, de cache-thyroïde et de lunettes plombées est de rigueur.

Le problème demeure pour la protection des mains. Des gants radio-atténueurs stérilisables sont disponibles sur le marché. Leur coût et leur encombrement semblent être les principales limites à leur utilisation. Certains praticiens soulignent également la perte de finesse de la sensibilité tactile ou des manipulations qui provoqueraient un allongement des procédures, et paradoxalement une surexposition. Il est donc nécessaire d'utiliser l'éloignement de la source et la diminution du temps d'exposition par la rotation du personnel et la restriction du nombre d'exams par opérateur. Pour cela, on doit connaître le plus précisément possible la dose d'irradiation de ces actes de radiologie (8).

La sensibilisation et la formation des intéressés restent l'élément majeur de la radioprotection. La formation des radiologues à la radioprotection est prévue au cours de leur cursus avec une formation spécifique au cours du troisième cycle ainsi qu'une formation post-universitaire. Pour les autres spécialités, l'utilisation des rayons X et la radioprotection ne font pas l'objet d'une formation obligatoire. Ceci pose un problème pour ces spécialistes pratiquant des actes de radiologie et pour certains la radiologie interventionnelle. L'utilisation de ces techniques nécessite une bonne connaissance de la radioprotection (102).

Le contrôle dosimétrique des extrémités n'est pas systématiquement obligatoire. Le développement de la dosimétrie opérationnelle devrait contribuer, en se généralisant, à améliorer la sensibilisation du personnel. Les dosimètres thermoluminescents sont actuellement parfaitement adaptés à l'évaluation de la dose main (8).

La surveillance des personnels concernés pourrait passer par l'examen capillaroscopique, non invasif et rapide, qui permet le dépistage infra-clinique des lésions vasculaires et donc un aspect prévisionnel des lésions cutanées doses-dépendantes à venir. Cette technique pourrait être mise en œuvre pour le personnel hospitalier exposé quotidiennement à de faibles doses de rayonnements ionisants.

La moitié des sujets qui ne présentent pas encore de signes cliniques ont, en capillaroscopie multiparamétrique, des altérations microvasculaires sous-unguéales évocatrices de lésions radiques.

Un ensemble d'anomalies est retrouvé constamment chez les sujets irradiés de façon chronique :

- une réduction du nombre de capillaires avec réduction de leur calibre et allongement de leur parcours,
- une désorganisation de la distribution,
- une réduction de la marge sous-unguéale,
- la présence d'un oedème et d'ectasies.

Ces signes sont strictement localisés aux zones exposées.

Une attitude pratique serait alors possible, guidée par l'existence ou non de ces altérations microvasculaires caractéristiques :

- surveillance simple,
- surveillance renforcée
- prise en charge radiopathologique avec limitation ou retrait d'exposition.

L'intérêt de cette technique de dépistage est en cours d'évaluation avec la caisse régionale d'assurance maladie d'Ile de France chez les praticiens hospitaliers de radiologie interventionnelle (8) (7).

7.1.3.3. Discussion

Dans notre observation, il s'agit d'un chirurgien-orthopédiste de 79 ans qui a présenté des lésions de radiodermite chronique. Concernant la description des lésions, notre patient présente les signes caractéristiques de radiodermite chronique associant un aspect poïkilodermique et aminci de la peau, des ongles épaissis, cassants et parcourus de mélanochynies. Sont apparues secondairement des lésions kératosiques. Il présente par ailleurs des dysesthésies au niveau de la partie distale des doigts.

Les lésions sont apparues 16 ans après le début de l'exposition aux rayons X, ce qui correspond aux données de la littérature : les lésions de radiodermite peuvent apparaître après un temps de latence long de plusieurs dizaines d'années après une exposition chronique à petites doses aux rayonnements ionisants.

Lors de l'apparition des lésions, le patient a changé de fonction mais la radiodermite a continué d'évoluer malgré l'arrêt de l'exposition. En effet, la radiodermite chronique évolue à partir d'une dose donnée pour son propre compte alors que toute exposition a disparu.

La localisation des lésions au niveau des mains correspond bien au champ d'irradiation des rayonnements ionisants puisque les mains ont été soumises au rayonnement primaire ainsi qu'au rayonnement diffusé par le patient. De nombreux travaux ont été publiés sur le niveau d'irradiation des organes les plus exposés lors des procédures utilisant les radioscopies. L'exposition des mains a été particulièrement étudiée : la dose d'irradiation est plus importante que pour les autres localisations.

Quant à la profession de chirurgien orthopédiste, l'exposition chronique aux rayonnements ionisants lors des radioscopies est bien connue. Dans les données de la littérature, les cas de radiodermite chronique étaient très fréquents chez les chirurgiens vers 1960 suite à l'utilisation importante des techniques de radioscopies, puis la pathologie a considérablement diminuée secondairement à la diminution de la pratique des radioscopies. Actuellement, on risque de voir réapparaître la pathologie en raison du développement de la radiologie interventionnelle.

Le patient a exercé sa profession de 1954 à 1973 pendant 19 ans et a donc été exposé pendant toute cette période aux rayonnements ionisants. Quand on s'intéresse aux données de la littérature, les durées d'exposition actuelles que l'on retrouve chez les chirurgiens sont des périodes de 20 à 30 ans, ce qui correspond à la durée d'exposition de notre praticien. Dans les données plus antérieures, les durées d'expositions étaient plus courtes avant l'apparition de la

maladie. Dans une revue de la littérature de 1972, l'auteur rapporte des périodes de 4 ans mais les expositions étaient probablement plus importantes et donc les pathologies plus précoces.

Pendant 19 ans, le patient a effectué toutes sortes de réductions de fractures allant de la phalange au fémur. Les temps de scopie étaient variables et pouvaient durer de 1 à 45 minutes. Le nombre de scopies effectuées était d'environ 5-6 par jour. Par ailleurs, il n'utilisait pas de gant et occasionnellement le tablier plombé.

Dans notre observation, nous ne connaissons pas l'énergie de l'appareil utilisé pour les radiosopies. Nous ne pouvons donc pas déterminer les doses reçues par le patient au cours de son activité professionnelle. Mais étant donné le nombre d'exams effectués, les temps de scopie qui pouvaient être très longs et l'absence de radioprotection, on peut supposer que les doses étaient proches des valeurs limites annuelles (500 mSv) ou même probablement supérieures.

D'après la littérature, les radiodermites chroniques peuvent apparaître pour des doses d'irradiation de 5 mSv par jour ou pour une dose cumulée à la peau de 10 gray. Des études effectuées sur l'enclouage médullaire rapporte des doses d'irradiation de 1,2 mSv par procédure pour des temps d'irradiation de 4,6 minutes, ce qui limite à 8 le nombre d'exams par semaine si on se rapporte à la limite annuelle de 500 mSv. Notre patient effectuait régulièrement des réductions de fracture avec des durées de scopie atteignant 45 minutes. En effet, il nous signale qu'il n'était pas informé sur les risques d'irradiation et par conséquent il laissait le radioscope en fonctionnement et ne limitait pas les temps de scopies.

C'est pourquoi, la formation et l'information des praticiens est primordiale ainsi que le respect des règles de radioprotection.

7.1.4. Observations rapportés chez les chirurgiens-dentistes et discussion

7.1.4.1. Observations de la littérature

De nombreux cas de radiodermite ont été rapportés chez les dentistes dans les années 1950-1960 suite à la pratique de clichés radiographiques sans précaution particulière. Actuellement cette pathologie est devenue rare chez les dentistes et les risques sont considérés négligeables si l'on respecte les règles de radioprotection (112).

Young et Kunkel (114) rapportèrent, en 1955, 52 cas de radiodermite des mains survenus chez des dentistes ; le plus jeune d'entre eux avait 34 ans. Dans tous les cas, les praticiens tenaient eux-mêmes la radiographie dentaire dans la bouche du patient. 31 % d'entre eux ont développé un cancer cutané et 3 des métastases.

Dans une étude réalisée par Shattuk en 1964 (68), 39 patients ont été traités pour radiodermite des mains ou pathologie cancéreuse. Les professions les plus exposées étaient les physiciens avec une large majorité (14 cas), puis survenaient les dentistes (4 cas) suivis des vétérinaires (2 cas).

En 1969, Smith (114) rapporta les cas de 112 dentistes ayant présenté des radiodermites des mains dans le Sud-est de l'Angleterre. 38,7 % (soit 80) ont admis qu'ils tenaient le film radiographique dans la bouche de leur patient. Alors que 46,5 % d'entre eux (soit 53) ont

déclaré ne jamais avoir utilisé cette pratique. Dans 14,8 % des cas, les données n'étaient pas connues.

En 1979 Andrew (114) décrit l'observation d'un chirurgien-dentiste de 43 ans qui a exercé pendant une période de 20 ans. Il tenait les radiographies dentaires entre ses doigts dans la bouche de ses patients. Il a été exposé à des radiations provenant d'un appareil dont l'énergie était de l'ordre de 50-70 kV. Il n'utilisait pas d'écran protecteur pendant la pratique des clichés. Le diagnostic de radiodermite a été posé à l'âge de 39 ans.

En 1995, Foley (59) expose le cas d'un chirurgien-dentiste de 52 ans qui a présenté une radiodermite chronique sur les deux mains puis un carcinome spino-cellulaire de la première phalange de l'annulaire gauche.

Il a débuté son activité en 1957 et avait pour habitude de tenir le film radiographique lui-même dans la bouche de ses patients. Au début il effectuait 15 clichés par jour puis son activité est devenue plus importante, il réalisait jusqu'à 40 clichés par jour en 1973.

En 1970, sont apparues les premières lésions. Le diagnostic d'eczéma lichénifié fut posé et un traitement par radiothérapie fut entrepris sans résultats. En 1973, le lien avec la radiodermite fut établi ; le dentiste pris alors des précautions dans la pratique des radiographies. Le carcinome spino-cellulaire de l'annulaire gauche est survenu en 1986 et une amputation de sa phalange distale fut effectuée.

Les doses d'irradiation ont été estimées à 14 gray sur le plan professionnel et à 12 gray concernant la radiothérapie.

Actuellement, les doses annuelles reçues par les dentistes et les techniciens se situent entre 0,5 et 1,25 mSv. Les risques encourus en radiologie dentaire sont négligeables à condition de respecter les règles de radioprotection. Celles-ci concernent l'appareillage, sa conformité et son entretien ainsi que son utilisation correcte (112).

7.1.4.2. Moyens de prévention en radiologie dentaire (73)

En premier lieu il faut s'assurer que l'on utilise un équipement qui répond aux normes actuelles et dont le bon fonctionnement est régulièrement contrôlé par un organisme agréé.

En second lieu, il faut respecter un certain nombre de règles relativement simples lors de la prise des clichés de radiologie :

- L'opérateur ne peut tenir la tête de radiographie, ni le collimateur et doit rester impérativement en dehors du faisceau utile. Il s'éloignera à plus de 2 mètres du patient et de l'appareil pour réduire l'exposition au rayonnement diffusé. Il se tiendra, par ailleurs, en retrait dans un angle au moins égal à 90° par rapport au faisceau primaire et de préférence entre 90° et 135°.
- Le câble de commande de l'exposition, les dimensions du local et la disposition de l'appareil et du fauteuil doivent lui permettre de se placer dans la configuration citée ci-avant.
- L'opérateur peut éventuellement se protéger derrière un écran ou plus simplement derrière un mur (en briques ou en béton d'épaisseur suffisante).

La vieille pratique consistant pour le praticien (ou son assistant) à maintenir les clichés radiologiques dans la bouche du patient doit être proscrite.

Ces règles de radioprotection seront rappelées régulièrement par l'organisme agréé pour le contrôle physique de l'appareil mais aussi par le médecin du travail responsable. Chaque dentiste ou chaque institution utilisant un ou des appareils de radiologie est tenu de s'affilier à un service de médecine du travail agréé pour le « contrôle du personnel professionnellement exposé aux radiations ionisantes ».

Le dentiste doit veiller à ce que son personnel soit informé du risque d'exposition aux rayonnements ionisants et des moyens de protection à utiliser. Une attention particulière sera portée à l'information des femmes en état de procréer.

Le port régulier du dosimètre individuel objectivera le fait que l'exposition du personnel en radiologie dentaire peut être maintenue à un niveau très bas si l'on respecte les règles de radioprotection.

Enfin l'éducation des dentistes en matière de radioprotection est essentielle.

7.1.4.3. Discussion

Dans notre observation, le patient a présenté une radiodermite chronique qui a débuté au niveau de la main droite à l'âge de 47 ans, soit 23 ans après le début de son activité. Celle-ci s'est compliquée secondairement d'un carcinome spino-cellulaire au niveau de l'index droit.

La radiodermite est surtout localisée au niveau des extrémités des trois premiers doigts de la main droite. Or, la patient tenait les clichés radiologiques entre le pouce et l'index au niveau de la bouche des patients. Il dirigeait l'appareil de radiologie en direction des radiographies et ses doigts étaient ainsi soumis directement au rayonnement primaire. Il était également exposé au rayonnement diffusé par le patient. Occasionnellement, il tenait le cliché de la main gauche ce qui peut expliquer la présence de lésions kératosiques à ce niveau.

Les radiographies dentaires effectuées duraient 0,26 secondes avec une dose d'irradiation de 0,42 mSv par cliché. Si on se réfère à la limite actuelle (500 mSv pour les mains), le nombre de clichés pouvant être effectués est de 1180 par an soit 5 par jour. Or le patient en effectuait trois à quatre fois plus (15 à 20 par jour). Selon ces données, nous pouvons estimer que la dose annuelle reçue par le patient était probablement supérieure aux limites annuelles réglementaires.

Notre chirurgien-dentiste tenait les clichés radiographiques avec ses doigts dans la bouche des patients. D'après les données de la littérature, de nombreux dentistes ont développé des radiodermes et on constate que la plupart d'entre eux maintenaient eux-mêmes les films radiographiques dans la bouche de leurs patients. Actuellement, les pathologies radio-induites sont de plus en plus rares. Les dernières observations publiées mettent en évidence que les praticiens ne respectaient pas les règles de radioprotection et tenaient eux-mêmes les clichés.

Si la dose délivrée lors d'un cliché unique est faible, la multiplicité des examens fait que les praticiens sont soumis à des petites doses répétées de rayonnements ionisants. C'est pourquoi, la radioprotection est essentielle et doit être pratiquée par tous les utilisateurs.

7.2. Accidents d'irradiation

Les accidents d'irradiation peuvent toucher tous les secteurs professionnels : médical, industriel et recherche.

Un accident d'irradiation est un événement fortuit, susceptible de porter atteinte à la santé de l'homme. Dans la réglementation française, on appelle « accident d'irradiation », une irradiation égale à 10 fois la limite réglementaire.

Nous allons répertorier les principaux accidents survenus récemment chez les travailleurs dans le cadre professionnel et en particulier dans le domaine industriel suivant les expositions externe et interne (79).

7.2.1. Exposition externe

Les accidents d'exposition externe sont les plus fréquents. Ils surviennent principalement chez les professionnels à l'occasion de travaux de cristallographie, d'analyse par fluorescence X ou de gammagraphie industrielle aux cours desquels la perte de la source et le non respect des mesures de sécurité sont les causes les plus fréquentes des accidents.

7.2.1.1. Les accidents ayant pour origine des sources industrielles

Les sources industrielles sont à l'origine de plus de 60 % des accidents. Les sources en cause sont des sources d'Iridium 192, de Cobalt 60, plus rarement de Césium 137, des accélérateurs linéaires et des appareils de rayons X.

Les accidents graves surviennent souvent chez des travailleurs affectés depuis peu dans l'entreprise, mais ils peuvent également concerner des salariés employés depuis quelques années (117).

◆ Les accidents dus à des sources d'Iridium 192

Les sources d'Iridium 192 équipant les appareils de gammagraphie sont à l'origine d'environ 30 % des accidents dus à des sources industrielles en raison de leur petite taille, de leur dissémination et de leur large utilisation sur le terrain. L'Iridium 192 d'une période de 74,2 jours émet des rayons gamma d'une énergie moyenne de 0,3 MeV. Ces sources sont à l'origine essentiellement d'accidents d'exposition localisée pouvant entraîner des lésions graves touchant principalement les mains (61).

En 1979, à Montpellier, un ouvrier ramasse sur un chantier une source de 0,5 TBq (14Ci), désolidarisée d'un gammagraphe et la garde huit heures dans sa poche. Il doit être amputé de la jambe gauche, du fait d'une atteinte sévère de l'artère fémorale.

A Kharkov en Ukraine, en septembre 1990, un travailleur tient dans la main gauche pendant 2 à 4 minutes une source d'une activité de 1 TBq environ (25,8 Ci) puis la met dans sa poche où elle reste pendant 4h 40. L'intéressé est hospitalisé au quatrième jour en raison de la survenue

de lésions cutanées qui motivent une excision des tissus atteints et une large greffe. La suite est satisfaisante malgré une dose à l'artère fémorale estimée à plus de 50 Gy (61).

◆ Les accidents dus à des source de Cobalt 60

Le Cobalt 60, d'une période 5,2 ans, émet des rayons gamma d'énergie élevée, et est à l'origine de plusieurs accidents dans des installations d'irradiation industrielle.

En Biélorussie, en octobre 1991, pour remédier à des défauts de convoyage des produits à irradier, un employé expérimenté pénètre dans la chambre d'irradiation d'une installation industrielle en violant les procédures et en court-circuitant les sécurités, alors que les barres de Cobalt étaient en position d'irradiation. Les premiers signes d'irradiation aiguë apparaissent dès le premier jour et la mort survient au quatrième mois par infection pulmonaire et hémorragie intestinale. La dose à l'ensemble du corps a été estimée supérieure à 10 Gy (61) (117).

Un accident de même nature est survenu en Israël en juin 1990. Un employé pénètre dans la salle de traitement d'une installation d'irradiation de produits à usage médical ou alimentaire équipée d'une source de 12,58 PBq (340000 Ci), en violant plusieurs consignes de sécurité et en ignorant les alarmes. L'exposition considérée comme uniforme a duré 1 à 2 minutes, la dose à l'organisme entier a été évaluée entre 10 et 20 Gy. La victime ayant vomi abondamment dans les 5 minutes après l'accident et présentant un érythème prononcé de la face et du thorax est hospitalisé dans les heures suivantes. Des signes graves d'irradiation du tube digestif se manifestent dès le troisième jour et le malade meurt le trente sixième jour dans un double tableau digestif et pulmonaire (61) (117).

L'accident survenant en 1989 au Salvador a concerné trois personnes qui ont pénétré dans une installation d'irradiation industrielle pour débloquer un porte-source. L'irradiation accidentelle est survenue suite à la défectuosité des matériels et des systèmes de sécurité, associée à une perte progressive de la vigilance et au manque d'informations sur les risques radioactifs. La première personne qui a été la plus irradiée avec une dose estimée à 8,1 grays, a présenté des vomissements dans les minutes suivant l'exposition. Puis est apparu un érythème généralisé associé à des brûlures aux pieds, aux jambes et aux mains. Les deux autres personnes ont subi des doses d'irradiations de l'ordre de 3 grays (117).

Un ensemble de six sources à usage industriel est importé en Chine en 1960. Après fermeture de l'installation en 1980, les sources sont stockées dans un puits sans contrôle. En 1992, un chantier de construction est ouvert à proximité du puits. Un ouvrier trouve une source et la met dans sa poche, il la rapporte chez lui. L'activité de celle-ci est à cette date de 0,4 TBq (12 Ci). Dans les 22 jours qui suivent la récupération de la source, l'ouvrier, son frère et son père meurent. Suite à ces trois décès, le diagnostic de radioexposition est évoqué et conduit à la découverte de la source (61).

Deux autres décès ont été rapportés liés à l'utilisation industrielle de sources de Cobalt 60. Ces accidents sont survenus suite à une négligence et / ou à une violation des procédures de sécurité par les travailleurs. Ils ont respectivement eu lieu en Italie en 1975 après une irradiation estimée à 10 Gy et en Norvège en 1982 après une dose de 20 Gy (87).

◆ Les accidents dus à des accélérateurs linéaires

Neuf accidents sont répertoriés de 1960 à 1992 sur des accélérateurs linéaires d'électrons selon la littérature (21) dans le domaine de l'industrie et de la recherche.

Date	Lieu	Installation	Victimes
1960	Albuquerque (USA)	Accélérateur Van de Graff	1 personne : brûlures multiples
1963	Saclay (France)	3,2 MeV	2 personnes : irradiation des mains (75-120 Gy)
1965	Rockford (USA)	10 MeV	1 personne : irradiation du bras droit et de la jambe droite
1972	URSS		1 personne : irradiation localisée
1985	Chine	Accélérateur Van de Graff	1 personne : brûlures de la main (63 Gy)
1985	Chine	Accélérateur Van de Graff	1 personne : brûlures des doigts
1985	Marietta (Georgie – USA)	Accélérateur Therac 25 ; X de 25 MeV et électrons de 5 et 25 MeV	1 personne : surdosage au bras
1991	Maryland (USA)	Accélérateur d'électrons	1 personne : brûlures graves des 2 mains
1992	Vietnam	17 MeV	1 personne : brûlures graves des 2 mains

Nous allons décrire principalement les accidents les plus graves :

- L'accident de Maryland est survenu en décembre 1991 auprès d'un accélérateur d'électrons implanté dans une installation industrielle d'irradiation. Cet accélérateur était consacré à l'irradiation de téflon sous diverses formes. Placée dans un convoyeur, la matière défilait sous un « scanner ».

L'appareil était arrêté le 11 décembre 1991 pour changer une double fenêtre en titane qui maintenait le vide dans le scanner. A l'issue de cette intervention, l'employé qui travaillait depuis un an et demi dans l'entreprise pénétra dans la salle d'irradiation. L'anode était coupée mais la haute tension était maintenue délivrant un courant 500 fois moins puissant qu'en fonctionnement normal. L'opérateur ignora les clignotements des signalisations lors de son entrée. Dans la chaîne de sécurité, se trouvaient trois détecteurs d'accès qui arrêtaient automatiquement l'accélérateur si un des faisceaux lumineux était coupé. Toutefois, le premier détecteur fut muni d'un interrupteur sans que l'agence chargée de diverses actions réglementaires en soit informée et était placé en position

« off » lors de l'accident. Le second détecteur fut placé à 1m 22 du sol et pouvait ainsi être évité en passant en dessous du faisceau lumineux. Le troisième système de détection par pression qui se déclenchait par le poids de l'opérateur fut retiré sans l'accord de l'agence.

Dès le lendemain de l'intervention, l'opérateur présentait une brûlure de l'annulaire, du majeur et de l'index de la main gauche. La dose reçue aux extrémités fut évaluée à $55 \pm 3,5$ Gy. Il fut amputé, 3 mois après l'accident de la majeure partie des quatre doigts de la main gauche ainsi que des quatre doigts de la main droite (117).

- L'accident survenu au Vietnam en novembre 1992 auprès d'un accélérateur d'électrons de 17 MeV est le plus récent. L'appareil était implanté dans une cellule blindée ceinturée d'un mur de béton de 1,4 m d'épaisseur. Le faisceau d'électrons qui interagissait avec une cible de tungstène produisait des photons et des neutrons. Lorsque la salle était en accès libre, les expérimentateurs venaient placer leurs échantillons face à la cible qu'ils reprenaient après irradiation à l'issue de l'arrêt manuel du faisceau. Les expérimentateurs ne possédaient pas de formation en radioprotection. De plus, ils ne disposaient pas de matériel de mesure portable de qualité. L'accélérateur n'était pas muni de système de sécurité et l'évacuation de la salle avant la mise sous faisceau était faite par simple avertissement oral. Seuls, deux signaux lumineux clignotants, placés à l'intérieur et à l'extérieur de l'entrée, informaient de la présence du faisceau.

Peu avant l'accident, le physicien quitta la salle d'irradiation avec son assistant après avoir disposé son échantillon devant la cible de tungstène. Tandis que l'assistant se dirigeait vers la salle de commande pour demander la mise sous faisceau, le physicien retourna dans la salle pour repositionner son échantillon et passa les mains à proximité de la cible de tungstène sans avoir entendu le bruit du magnétron qui était couvert par la forte ambiance sonore de la salle.

L'exposition accidentelle a duré 2 à 4 minutes, la dose moyenne délivrée à l'organisme entier a été estimée à 1,5 Gy. Dix jours après l'accident, la peau de la face palmaire des mains commençait à peler puis se développaient un érythème et un œdème. Il fut hospitalisé 24 jours après l'accident et amputé de la main droite en juillet 1993. En décembre 1993, il fut amputé d'un doigt de la main gauche devant l'apparition de lésions et de douleurs (117).

◆ Les accidents de criticité

L'accident de criticité résulte du déclenchement d'une réaction de fission en chaîne au sein d'une masse de matière fissile (Uranium enrichi en Uranium 235 et/ou Plutonium). Ils surviennent en général dans les centrales nucléaires au cours de travaux de recherche et au cours d'opérations chimiques utilisant des matières fissiles. Les installations de traitement chimique de l'Uranium ou du Plutonium, usines d'enrichissement de l'Uranium, ateliers de fabrication des combustibles, les usines de retraitement des combustibles irradiés, sont de loin les plus sensibles (61).

Entre les années 1945 et 1983, sept accidents de criticité sont survenus dans des réacteurs de recherche ayant entraîné 9 décès (79).

Accidents de criticité		
1958	Vinca (Yougoslavie)	1 décès (8 irradiés)
1961	Idaho Falls (USA)	3 décès
1945	Los Alamos (USA)	1 décès
1946		1 décès
1958		1 décès
	Rhode Island (USA)	1 décès
1983	Buenos-Aires (Argentine)	1 décès

Quelques autres accidents de criticité non mortels sont survenus. On peut aussi citer les accidents survenus sur les sous-marins nucléaires soviétiques, dont trois au moins sont responsables d'une vingtaine de décès. Les causes précises de ces accidents restent mal définies (79).

7.2.1.2. Les accidents ayant pour origine des sources médicales

Ils concernent dans plus de la moitié des cas des techniciens assurant le chargement ou le changement des sources dans la tête d'appareils de radiothérapie.

Un accident a été recensé en Tchécoslovaquie en décembre 1973. Lors du changement d'une source de Cobalt 60 de 110 TBq (3000 Curies), la source est tombée au sol. Un des techniciens reçut une dose de 1,59 Gy et présenta des brûlures radiologiques graves à la main gauche qui nécessitèrent l'amputation de quatre doigts, ainsi qu'une cataracte survenue 17 mois après l'accident.

Un accident analogue s'est produit en France à Saintes en 1981 lors du chargement d'une source de Cobalt 60 d'une activité de 137 Tbq (3700 Ci) qui resta coincée dans le canal de chargement. Trois techniciens furent victimes de lésions locales très graves. La dose moyenne à l'organisme entier a été estimée aux environs de 21 Gy pour deux des techniciens (61).

7.2.1.3. Les accidents d'irradiation dans les laboratoires de recherche

Leur inventaire exhaustif n'est pas connu, car il s'agit le plus souvent d'irradiations aiguës localisées guérissant sans séquelles (79).

Cas examinés pour irradiation externe localisée à l'Institut Curie de 1956 à 1983 :		Cas avec des radiolésions aiguës localisées sévères	
Sources	Nombre	Sources	Nombre
Cristallographie, travaux expérimentaux (rayons X)	60 cas 28,6 %	²²⁶ Ra	1
Réacteurs, accélérateurs expérimentaux	14 cas 6,9 %	X de faible énergie	4
Radiodiagnostic-radiothérapie	30 cas 14,3 %	X (cristallographie)	22
Usages industriels	105 cas 50,2 %	¹⁹² Ir	18
		⁶⁰ Co	10
		¹³⁷ Cs	1
		Electrons	3
		Neutrons	1
Total	209 cas	Total	60

7.2.2. Exposition interne (61)

Une exposition interne accidentelle peut survenir à la suite d'une dispersion de la radioactivité dans le milieu ambiant lors d'activités professionnelles, tout particulièrement dans l'industrie nucléaire. Les accidents d'exposition interne sont rares.

Quelques accidents ont été signalés dans l'industrie. L'utilisation industrielle de peinture tritiée est à l'origine de deux accidents mortels en 1961 et en 1964. Une contamination accidentelle par l'Américium 241 est survenue à Hanfort (USA) en 1976. L'explosion d'une boîte à gants entraîna, chez un travailleur qui manipulait, des brûlures cutanées et une contamination pulmonaire importante.

7.2.3. Etudes réalisées en France

De 1951 à 1998, 696 patients ont été vus et examinés à l'Institut Curie pour une irradiation accidentelle dont 568 français et 128 étrangers (ces derniers étant les plus sévèrement touchés). La grande majorité de ces accidents ont eu lieu au poste de travail et en particulier dans l'industrie. L'industrie nucléaire civile est quant à elle très sous-représentée dans ce registre avec un nombre d'accidents trois fois inférieur à celui de l'industrie. C'est principalement chez les sous-traitants de l'industrie que l'on retrouve les victimes : celles-ci sont davantage des manoeuvres que des cadres (5) (39).

Le nombre de personnes concernées paraît stable. Dans la majorité des cas, les niveaux d'irradiation sont bas. En France, 21,6 % des personnes présentent des effets déterministes

nécessitant un traitement ; 4,9 % des cas sont considérés comme sévères. Les caractéristiques principales de ces données sont conformes aux données publiées antérieurement par l'UNSCEAR (39).

Pendant cette même période, une analyse a été effectuée conjointement par l'Institut Curie et le CEPN (Centre d'Etude de la Protection dans le domaine Nucléaire). 211 personnes du secteur industriel ont été irradiées de façon accidentelle dans le cadre de leur activité professionnelle. 70 % des cas sont imputables à la pratique de la gammagraphie industrielle. Une étude a été réalisée sur 20 cas d'accidents d'irradiation imputés à la gammagraphie les 20 dernières années (1978-1998). Dans la moitié des cas, le facteur humain est prépondérant avec des erreurs de jugement, des infractions à la réglementation. Ensuite, apparaissent les défaillances techniques de l'appareillage et les maintenances inadéquates des appareils (41) (42).

La fréquence des accidents radio-induits reste stable alors que les applications médicales, industrielles et scientifiques se multiplient. Aucun décès dû à un accident aigu d'irradiation n'a jamais été recensé en France jusqu'à présent (13). Mais l'analyse de ces accidents montre que la plupart des conséquences graves pourraient être évitées par des mesures adaptées.

7.2.4. Place de nos observations 3,4 et 5 dans la littérature - Discussion

Le lien est clairement établi entre les lésions de radiodermite aiguë et l'exposition accidentelle de ces salariés. Les lésions sont apparues dans les heures ou les jours qui ont suivi l'irradiation, et se sont progressivement étendues avec l'apparition de nouvelles lésions quelques semaines, voire quelques mois après, malgré l'arrêt de l'exposition. Dans la littérature, on retrouve des cas de radiodermes aiguës semblables touchant en particulier les téguments puis les tissus plus profonds lorsque l'irradiation est plus importante. Ces atteintes concernent le plus souvent des zones localisées au niveau des doigts et des mains et des brûlures radiologiques accidentelles étendues comme c'est le cas dans cet exemple sont plutôt rares.

Nous allons tenter d'analyser les causes de l'accident :

On constate tout d'abord l'absence de formation des salariés, en particulier des deux manutentionnaires qui n'ont eu aucune formation préalable de radioprotection, alors qu'ils intervenaient régulièrement auprès de l'accélérateur d'électrons. Ces deux personnes ont été les plus touchées. Dans la littérature, on observe que les accidents surviennent en particulier chez des personnes peu expérimentées travaillant depuis peu auprès des accélérateurs. Elles ne connaissent pas les risques potentielles graves d'une irradiation.

Les salariés sont intervenus à plusieurs reprises dans la cellule d'irradiation pour remédier à la survenue des incidents. Lors de leur dernière intervention, ils ont essayé de réparer une panne du système d'aération. Il existait donc des défaillances techniques de l'appareil et des anomalies de dysfonctionnement.

Il existe également une succession de non-respect des règles de radioprotection :

- Premièrement, il y a eu une première alerte début juillet 1991 lors de l'intervention du chef de production dans la cellule d'irradiation pour éteindre le feu. La source avait été coupée mais la haute tension maintenue. Il demeurait donc un rayonnement avec un débit de dose de haute énergie des électrons. La dosimétrie avait révélé une irradiation de 150 mSv en quelques minutes. Cette dose était déjà une alerte puis qu'elle correspondait à trois fois la limite annuelle de 1991 c'est-à-dire 50 mSv. Cependant, cette exposition est passée inaperçue et n'a donc pas été signalée aux autorités compétentes.
- Deuxièmement, les deux manutentionnaires n'intervenaient pas dans la cellule d'irradiation par l'accès normal qui devait se faire par une porte munie d'un système de sécurité ne permettant son ouverture que lors de l'arrêt complet de l'appareil. Ils passaient à l'intérieur de la cellule d'irradiation par l'intermédiaire de la fenêtre de sortie du convoyeur à bande et contournaient ainsi le système de sécurité.
- Troisièmement, lors des interventions, les employés coupaient seulement l'intensité, la haute tension étant ainsi maintenue. Il persistait un courant résiduel suffisant pour atteindre un débit de dose de quelques dizaines de grays par minute.
- Alors que l'accélérateur était sous tension, les deux manutentionnaires intervenaient en mettant la tête, les mains et le tronc sous le scanner alors que celui-ci dégageait toujours un rayonnement. Ils étaient donc soumis au rayonnement direct de l'appareil.

En reprenant les différents points précédents, on constate qu'il existe une succession d'événements qui a entraîné l'exposition accidentelle des salariés : le manque de formation, le dysfonctionnement de l'appareillage et le non respect de la chaîne de sécurité.

Cet accident a beaucoup de similitudes avec l'accident de Maryland survenu dans la même année avec un accélérateur du même type. Il existait bien les systèmes de sécurité mais ces derniers avaient été court-circuités sans doute par manque d'information sur les risques potentiels.

On constate qu'en analysant les autres cas d'irradiation accidentelle survenus dans le domaine industriel, la cause la plus fréquente d'accident d'irradiation est la violation des systèmes de sécurité, le manque de formation des salariés. Puis arrivent les défaillances techniques : les modifications importantes des propriétés physiques d'un grand nombre de produits irradiés tels que le durcissement des huiles et des graisses, la fragilisation des cartons, bois, colles et liants divers, l'altération des caractéristiques de divers composants électriques ou électroniques.

En conclusion :

- la formation et l'information des salariés sur la protection contre les dangers des rayonnements ionisants sont primordiales. Cette formation doit être régulièrement renouvelée et assurée pour toutes les personnes qui interviennent dans les installations où est implanté un irradiateur. Cette formation doit prendre en compte, en plus de l'information générale sur les risques, l'examen des situations incidentelles ou accidentelles survenues auprès de divers irradiateurs dans le monde.
- Il est également important qu'il y ait une personne compétente en radioprotection dans les entreprises utilisant des rayonnements ionisants, et que celle-ci soit responsable et veille au bon respect des règles de radioprotection et de sécurité. Si une personne de l'entreprise

constate un dysfonctionnement, elle doit informer la personne désignée comme compétente en radioprotection qui peut prévenir les autorités compétentes si nécessaire.

- Afin d'éviter une défaillance technique de l'appareil, il est nécessaire de procéder dès sa conception à la vérification de la fiabilité des éléments intervenant dans le système de sécurité. Il faut également prévoir la rédaction de prescriptions techniques portant sur le changement préventif d'éléments importants dans la sécurité, de modes opératoires pour la réalisation des tests périodiques de la chaîne de sécurité, des procédures d'interventions en situation normale et particulière.
- Le système de sécurité qui autorise d'une part l'arrêt ou la mise sous faisceau, le maintien de la source de rayonnements et d'autre part l'accès à la casemate d'irradiation est un élément clé de la sécurité. Un effort particulier doit être entrepris pour rendre inviolable les différentes fonctions de la chaîne car on constate que dans l'accident de Forbach les systèmes de sécurité étaient bien présents, mais ils ont été contournés, entraînant des accidents graves.
- Lorsque la chaîne de sécurité autorise l'accès à la cellule d'irradiation, il convient d'ajouter un appareil, indépendant des autres, qui permettrait de vérifier par une mesure l'absence de rayonnement.
- Les interventions « hors routine » mises en œuvre lors de situations particulières doivent, lorsqu'elles conduisent à modifier une ou plusieurs séquences du système de sécurité, faire l'objet de procédures écrites et validées préalablement. En effet, l'action improvisée d'une personne seule présente souvent un risque élevé d'accident grave.

Les accidents aux conséquences radiologiques sévères, bien que rares dans le domaine industriel, pourraient être diminués en respectant les mesures de radioprotection. En effet, il est particulièrement important de rester vigilant et d'analyser ces retours d'expériences car les utilisations industrielles des rayonnements ionisants sont de plus en plus nombreuses. La formation et l'information périodique du personnel afin qu'il reste sensibilisé aux risques potentiels, graves d'une exposition aux rayonnements ionisants, le contrôle radiologique systématique des rentrées de sources dans leur logement de protection avant de pénétrer dans la salle d'irradiation et l'inviolabilité de la chaîne des techniques permettent de réduire les risques d'accidents.

7.3. Leucémies et lymphomes non Hodgkiniens

Les principaux éléments de la littérature concernant le lien entre les radiations ionisantes et les leucémies et plus particulièrement les lymphomes non hodgkinien seront évoqués. Un bref rappel sur les lymphomes de Burkitt sera réalisé. Enfin, l'observation n°6 sera discutée par rapport aux données de la littérature.

7.3.1. Leucémies

Elles sont connues depuis 1911 et ont donné lieu à de nombreuses études épidémiologiques.

Elles ont été rapportées chez des radiologues morts aux USA entre 1929 et 1957 où la fréquence des leucémies a été dix fois plus grande que chez les médecins d'autres spécialités. Les doses estimées ont été de 1 Gy par an pendant plusieurs dizaines d'années (54).

Les enquêtes effectuées chez les travailleurs de l'industrie nucléaire permettent de mettre en évidence une légère augmentation des leucémies (109).

Les leucémies surviennent après une latence de 3 à 5 ans selon les données d'Hiroshima et de Nagasaki pour atteindre un pic de fréquence à 8-10 ans jusqu'à revenir à des taux normaux après 30 ans. Les sujets de moins de 15 ans sont beaucoup plus sensibles au risque leucémogène (35). L'augmentation de la fréquence n'est établie que pour des doses supérieures à 200 mSv en irradiation à débit élevé et 400 mSv à débit faible (109).

L'exposition aux rayonnements ionisants entraîne une augmentation des leucémies, en particulier des leucémies aiguës lymphoïdes (LAL), des leucémies aiguës myéloïdes (LAM) et des leucémies myéloïdes chroniques (LMC).

Il existe une prédominance de leucémies aiguës selon les données épidémiologiques après irradiation à dose élevée et à débit de dose élevée (82). Deux études récentes, l'une effectuée en Ile de France (51) et l'autre en Belgique (82), relatives aux maladies professionnelles secondaires à l'exposition aux radiations ionisantes, démontrent également la prédominance de leucémies aiguës. Les LMA prédominent et sont trois fois plus fréquentes que les LAL dans l'étude réalisée en Belgique ; ces données sont retrouvées dans les mêmes proportions dans la littérature (103). Dans cette même enquête, l'âge moyen de survenue des LAL et des LMA est de 42 ans.

Les LMC peuvent survenir à tout âge, mais surtout chez l'adulte jeune, entre 20 et 40 ans, les hommes étant légèrement plus souvent atteints que les femmes (75).

Actuellement, il n'existe pas d'argument, selon les données de la littérature, permettant de dire que les leucémies lymphoïdes chroniques (LLC) et les maladies de Hodgkin puissent être secondaires à l'exposition aux radiations ionisantes (103). Il en est de même pour la leucémie à tricholeucocytes.

7.3.2. Lymphomes non Hodgkiniens (LNH)

Les lymphomes sont rares comparativement aux leucémies mais augmentent de façon régulière dans tous les pays. Des études longitudinales ont montré une augmentation de la fréquence des lymphomes de l'ordre de 5 à 10 % par an. Le risque relatif était de 12,4 cas pour 100000 habitants en 1987 aux Etats-Unis, alors que les lymphomes représentent actuellement le cinquième cancer le plus fréquent chez l'homme et le sixième chez la femme (53). Quant aux lymphomes de Burkitt, ils ne représentent que 5 % des lymphomes de l'adulte. Différents agents environnementaux tels que les pesticides ou les colorants capillaires ont été incriminés comme étant les facteurs de survenue de lymphomes. Concernant les radiations ionisantes, le lien n'est pas encore clairement établi (82). Nous allons donc analyser les différentes études réalisées.

◆ Etudes effectuées sur la population générale :

Concernant les données d'Hiroshima et de Nagasaki, aucune augmentation n'a été observée pour les lymphomes (111), le risque relatif a été estimé à 0,95 pour des doses de 1 Gy selon

les données les plus récentes. Des études plus anciennes suggèrent une association entre les LNH et les radiations, mais les dosimétries étaient incomplètes et les rapports étaient basés sur des autopsies (21).

◆ Observations rapportées lors des procédures de diagnostic de rayons X :

On n'a pas rapporté d'association entre les LNH et l'exposition à des techniques utilisant des faibles doses de rayons X.

Des patients atteints de tuberculose recevaient régulièrement des rayons X au niveau de la poitrine lors des fluoroscopies pour traiter les poumons. Chez les 6285 patients suivis pendant 40 ans, on n'a pas observé d'excès de lymphomes. Une étude complémentaire a été réalisée sur 318 patients et n'a pas montré d'association entre l'irradiation et les lymphomes.(21).

◆ Etudes réalisées chez les patients traités par radiothérapie :

Un lien a été suggéré entre l'irradiation à de très fortes doses et les lymphomes malins chez les patients traités par radiothérapie.

L'évidence la plus forte vient d'une étude réalisée sur des patients traités par irradiation pour une spondylarthrite ankylosante. On a observé 16 décès par lymphomes malins alors qu'on en attendait 7,1. Cependant la dose d'irradiation du tissu lymphatique n'a pas été déterminée et le terrain de déficit immunitaire a pu jouer un rôle (21).

Une augmentation non significative de LNH a été mise en évidence chez des patients traités par radiothérapie pour un cancer cervical, mais on n'a pas mis en évidence de relation dose-effet.

Les patients ayant été traités par radiothérapie pour un cancer du col de l'utérus n'ont pas eu d'augmentation du risque de LNH.

Les LNH ont régulièrement été retrouvés en excès après traitement de la maladie de Hodgkin, mais aucun paramètre thérapeutique, et en particulier aucun paramètre technique de radiothérapie, n'a jamais pu être rattaché à leur apparition. De plus, cette augmentation de LNH pourrait être attribuée à une immunosuppression ou à un déficit immunitaire. Selon Cosset, il semble que l'on puisse disculper la radiothérapie de toute implication dans l'apparition de lymphomes non hodgkiniens secondaires (35).

Les patients traités pour des troubles menstruels bénins ou la teigne du cuir chevelu n'ont pas eu d'augmentation de LNH bien qu'une augmentation significative de leucémies ait été retrouvée (21).

Des études effectuées sur des populations importantes de patients atteints de cancers primitifs divers ont suggéré un lien entre les LNH et la radiothérapie sur corps entier ou sur des sites particuliers. Parmi 600000 cancers traités au Danemark et dans le Connecticut, 586 lymphomes secondaires ont été rapportés. Ce résultat était proche mais légèrement supérieur au nombre attendu : 563, basé sur les statistiques des populations des deux pays. Selon Boice (21), l'incidence des lymphomes secondaires est peut être légèrement augmentée par rapport à celle des lymphomes primitifs de la population générale et le traitement par radiothérapie de la maladie primitive est peut être responsable d'une légère augmentation de LNH.

◆ Données concernant l'exposition aux radionucléides :

Les études réalisées en Suède sur plus de 45000 patients qui recevaient des doses thérapeutiques d'Iode radioactif n'ont pas montré d'augmentation de lymphomes (21).

Par contre, chez les patients traités par injection de Thorotrast (dioxyde de thorium colloïdal) utilisé de 1928 à 1955 comme produit de contraste pour les angiographies, on a relevé une fréquence élevée de lymphomes malins. Ceci s'explique par le fait que le Thorium²³² et ses éléments de filiation, émetteurs alpha, restent dans le corps à vie. Les particules colloïdales de Thorium se fixent de façon quasi-définitive dans le système réticulo-endothélial et délivrent au niveau des lysosomes des cellules macrophagiques de la moelle osseuse des doses très élevées dans des volumes cibles très microscopiques (61).

◆ Etudes effectuées sur des travailleurs exposés professionnellement aux rayonnements ionisants :

Les enquêtes réalisées chez les radiologues américains ayant exercé entre 1920 et 1940, période où la radioprotection était rudimentaire, montraient une augmentation de leucémies et de lymphomes par rapport aux médecins qui n'utilisaient pas les radiations ionisantes (61).

D'autres études réalisées sur 27000 radiologistes en Chine n'ont pas relevé d'excès de lymphomes (21).

Une étude a été effectuée chez les travailleurs de la première usine nucléaire russe (Mayak). Au début de l'activité de cette usine, un pourcentage important de travailleurs a reçu des doses de rayonnement externe supérieures à 1000 mSv par an, les résultats suggèrent une augmentation des leucémies et des lymphomes (4).

Les études plus récentes réalisées sur les travailleurs des centrales nucléaires n'ont pas mis en évidence de lien entre l'irradiation et les LNH (21).

7.3.3. Lymphomes de Burkitt

Le lymphome de Burkitt est secondaire à la prolifération maligne monoclonale de cellules lymphoïdes se développant initialement au niveau des organes lymphoïdes et pouvant secondairement envahir les viscères.

Il existe essentiellement sous la forme endémique africaine et est beaucoup plus rare en Occident où il peut survenir de façon sporadique. En Occident, il est tout de même le plus fréquent des lymphomes chez l'enfant mais ne représente que 3 à 5 % des lymphomes de l'adulte. Il peut survenir chez le sujet âgé où il est de mauvais pronostic.

Le lymphome de Burkitt est fréquemment associé à l'EBV dans la forme endémique (80 - 90% des cas) alors qu'il ne l'est que dans 10 à 15 % des cas en Occident. De nombreux travaux ont été effectués sur le rôle de l'EBV dans le lymphome de Burkitt. Son rôle est probablement majeur dans la forme endémique de la maladie mais paraît moins important dans la forme sporadique. On a également constaté une incidence anormalement élevée de lymphomes de Burkitt chez les patients infectées par le VIH (30 % des lymphomes).

On retrouve la translocation t(8 ; 14) impliquant l'oncogène c-myc dans 80 % des lymphomes de Burkitt, la translocation t(2 ; 8) dans 15 % des cas et la t(8 ; 22) dans 5 % des cas.

Les localisations principales sont digestive, médullaire et neuro-méningée. Les localisations ganglionnaires périphériques sont plus rares (10 - 20 %). Les formes leucémiques pures sont rares et sont classées en LAL 3 dans la classification de FAB.

Ferrieu (56) a réalisé des études in vitro sur l'effet des rayons gamma sur le virus d'Epstein-Barr présent dans des cellules de lymphome de Burkitt. Une irradiation de 2 et 4 Gy a été effectuée, il a été mis en évidence une réactivation du virus d'Epstein-Barr. L'auteur émet l'hypothèse que l'association de l'irradiation gamma et du stress pourrait jouer un rôle important dans la réactivation du virus d'Epstein-Barr.

7.3.4. Place de l'observation n°6 dans la littérature - Discussion

Dans notre observation, la patiente a présenté un lymphome leucémique de type Burkitt à l'âge de 76 ans.

Les lymphomes non Hodgkiniens bien qu'en augmentation sont encore peu fréquents comparativement aux leucémies. Il est donc plus difficile de les mettre en évidence sur le plan professionnel.

Des études effectuées sur un nombre important de patients (600000) au Danemark et dans le Connecticut suggèrent une légère augmentation de LNH par rapport à l'incidence de lymphomes primitifs dans la population générale.

D'autres études ont été faites sur un nombre moins important de personnes et ne montrent pas d'augmentation de lymphomes liée aux radiations ionisantes. Le nombre de personnes étudié est peut-être insuffisant pour permettre de mettre en évidence une augmentation significative.

Concernant les doses d'irradiation :

- la patiente a exercé pendant 15 ans dans un service de radiothérapie externe où il est difficile d'évaluer l'importance de l'irradiation.
- Puis elle a travaillé dans un service de curiethérapie où elle a manipulé du Radium pendant 13 ans. Il n'y a pas eu de dosimétrie pendant les 9 premières années mais on peut supposer que les doses d'irradiation étaient relativement importantes, étant donné les conditions de manipulation du Radium ainsi que de son fort pouvoir irradiant (période de 1400 ans). En effet, la patiente n'utilisait aucune radioprotection lors de la manipulation du Radium, elle entrait dans la chambre du malade sans aucune protection, des sources de Radium étaient parfois perdues.

Les premières dosimétries poitrine sont apparues en 1970 à la fin de la manipulation du Radium. Quand on regarde les valeurs relevées, elles sont de l'ordre de 30 à 40 mSv par an, ce qui est proche de la limite réglementaire de cette période (50 mSv) et dépasse les valeurs actuelles (20 mSv). On constate qu'il n'y a pas de relevé dosimétrique pour certains mois, si bien que l'on peut se demander si la patiente portait le dosimètre en permanence lors de ses activités.

Avec l'arrivée de l'Iridium et du Césium, on constate que les valeurs dosimétriques au niveau de la poitrine baissent progressivement pour atteindre des niveaux faibles de l'ordre de 2 mSv en 1980 à la fin de la carrière de la patiente.

Quand on reprend l'historique de sa carrière, on peut estimer que la patiente a été exposée à des doses relativement importantes de rayonnements ionisants.

On peut penser qu'une irradiation à de fortes doses puisse être responsable d'une augmentation de LNH selon les données épidémiologiques :

Chez les patients traités par le Thorium, on a relevé une fréquence élevée de lymphomes malins. En effet, le Thorium délivre des doses importantes au niveau de la moelle osseuse et reste dans le corps à vie.

Sur le plan professionnel, les études effectuées chez les radiologues suggèrent une augmentation de lymphomes pour des doses d'irradiation importantes.

Cependant, les études réalisées avec des doses d'irradiation plus faibles ne montrent pas d'augmentation de lymphomes. C'est le problème du passage des fortes doses aux faibles doses de rayonnements ionisants que l'on retrouve pour tous les types de cancers.

Le lymphome de Burkitt peut être induit par le virus d'Epstein-Barr mais ce dernier est beaucoup plus rare chez les occidentaux et représente 10 à 15 % des cas. Chez notre patiente, la sérologie EBV est positive. On peut supposer que celui-ci a joué un rôle dans l'induction de la maladie. Quand on reprend les données de la littérature, des expériences in vitro montrent que les rayonnements ionisants, en particulier les rayons gamma, peuvent induire une réactivation du virus d'Epstein-Barr dans les cellules. Or la patiente a été exposée au Radium, à l'Iridium et au Césium qui sont des émetteurs gamma. On peut supposer que les rayons gamma auxquels la patiente a été exposée aient pu jouer un rôle dans la réactivation du virus d'Epstein-Barr et donc dans l'apparition du lymphome.

En conclusion, la patiente a été exposée tout au long de sa carrière à des doses relativement importantes de rayonnements ionisants pendant une période de 34 ans. Au décours de son activité professionnelle, elle a présenté un lymphome leucémique de type Burkitt. Il est difficile d'affirmer avec certitude le lien entre la maladie et l'exposition aux rayonnements ionisants. En effet, les pathologies cancéreuses secondaires aux rayonnements ionisants n'ont aucune spécificité qui permet de les différencier des autres cancers. La prudence actuelle fait que le moindre doute est en faveur du travailleur, comme le mentionne l'enquête effectuée en Belgique où deux LNH ont été reconnus. La présomption d'origine est donc en faveur de la patiente, elle a d'ailleurs été reconnue en maladie professionnelle.

7.4. Cancers broncho-pulmonaires

7.4.1. Observations de la littérature

Ils représentent la première cause de décès par cancer chez l'homme et sont en augmentation chez la femme. L'âge médian de survenue est de 60 ans et 75 % des patients ont entre 50 et 70 ans au moment du diagnostic.

90 % des décès par cancer broncho-pulmonaire peuvent être attribués à la consommation de tabac. Le risque relatif d'un fumeur est de 4 à 30 fois supérieur à celui d'un non-fumeur selon la quantité fumée. Le tabagisme agit comme un facteur multiplicatif du risque relatif lié à l'exposition professionnelle aux radiations ionisantes.

Le type histologique le plus souvent rencontré est la cancer bronchique à petites cellules chez les mineurs d'Uranium, sinon les épithéliomas épidermoïdes sont les plus fréquents (96). La période de latence de survenue de cancer du poumon est de 15 à 20 ans en moyenne (61).

Nous allons voir les tumeurs broncho-pulmonaires par inhalation connus sur le plan professionnel puis les cancers secondaires aux irradiations externes.

◆ **Cancers broncho-pulmonaires par inhalation**

Les premiers cas de cancers pulmonaires par inhalation ont été démontrés chez les mineurs de Schneeberg en 1879. En 1921, on démontrait que l'inhalation du gaz Radon provenant de l'Uranium était responsable de l'augmentation des cancers broncho-pulmonaires.

Une étude réalisée chez 68000 mineurs mettait en évidence 2700 décès par cancers broncho-pulmonaires. L'excès de risque relatif était lié de façon linéaire à la dose mais il existait d'autres facteurs carcinogènes, en particulier le tabagisme. Des études complémentaires chez les mineurs d'Uranium du Colorado ont montré que le risque restait augmenté après exposition au Radon, même chez les non-fumeurs (35).

Chez les mineurs d'Uranium, on ne constate aucune augmentation de la fréquence des cancers du poumon pour des doses totales inférieures à 500 mSv (4).

En 1994, 11 études ont fait l'objet d'une méta-analyse : chacune de ces études établit entre le risque de cancer pulmonaire et le cumul d'exposition au Radon une relation figurée par une droite de pente variable, mais toujours positive. L'analyse combinée des 11 cohortes définit un excès de risque relatif de cancer pulmonaire lié à l'exposition au Radon de 0,5 % par WLM (unité de mesure utilisée pour évaluer l'exposition au Radon des mineurs correspondant à environ 5 mSv) (63).

Une étude de cohorte (115) a été réalisée de 1943 à 1977 sur 15727 salariés du « Los Alamos National Laboratory » qui est un laboratoire de recherche et de développement sur le nucléaire. Les salariés étaient soumis au Plutonium mais également à des radiations externes (rayons X, gamma et neutrons).

Concernant les personnes exposées au Plutonium, une augmentation non significative de cancers du poumon (SMR = 1,78 avec 95% CI = 0,79-3,99) a été mise en évidence. Il existe de plus des incertitudes sur le tabagisme. Les doses d'irradiation cumulées étaient divisées en plusieurs catégories allant de moins de 10 mSv à plus de 100 mSv.

◆ **Cancers broncho-pulmonaires secondaires aux irradiations externes**

- Les données d'Hiroshima et de Nagasaki suggèrent une augmentation des cancers solides dont les cancers du poumon après irradiation externe (rayons gamma et neutrons), mais il n'est pas détecté d'augmentation de risque pour les doses inférieures à 200-500 mSv (35).

- Le risque de cancers broncho-pulmonaires secondaires à la radiothérapie a été retrouvé significativement très augmenté dans plusieurs séries. La littérature fait état d'un RR se situant dans une marge de 1,9 à 7,7 (35).

Après irradiation pour la maladie de Hodgkin, le risque relatif de cancers est significativement augmenté (de l'ordre de 3 à 10). Le taux d'incidence cumulative de cancers à 15 ans est de 6%, mais il semble que la chimiothérapie augmente le risque de cancer radio-induit (66).

Une étude récente (35) a précisé le rôle de la dose d'irradiation, montrant que le risque de cancer broncho-pulmonaire secondaire augmentait significativement avec la dose délivrée. Chez les patients ayant reçu plus de 9 Grays, le risque était retrouvé dix fois plus élevé que chez ceux ayant reçu moins de 1 Gray. La même étude insistait sur le rôle du tabagisme associé. A dose d'irradiation égale, le risque était toujours significativement plus élevé chez les patients qui continuaient à fumer après leur radiothérapie que chez ceux qui avaient renoncé à leur intoxication tabagique.

- Sur le plan professionnel, des enquêtes ont été réalisées sur des populations importantes de salariés :

Une étude de cohorte (115) a été réalisée de 1943 à 1977 sur 15727 salariés du « Los Alamos National Laboratory » exposés à des irradiations externes (rayons X, gamma et neutrons). L'enquête ne met pas en évidence d'augmentation significative de cancers du poumon. La majorité des doses cumulées est en dessous de 50 mSv, la dose cumulée maximum étant de 293,4 mSv.

Une autre étude (100) a été effectuée sur 14095 personnes travaillant au « Oak Ridge National laboratory », laboratoire de recherche sur le nucléaire. Cette enquête portait sur les personnes exposées à des radiations externes entre 1943 et 1972 et sur l'influence de l'âge. La mortalité pour tous types de cancer est augmentée de 4,98 % pour 10 mSv reçu après l'âge de 45 ans avec un « lag time » de 10 ans, ce chiffre est augmenté à 7,31 % pour un « lag time » de 20 ans. Les résultats sont identiques pour les cancers du poumon pour lesquels on retrouve des valeurs de 5,48 % (« lag time » de 10 ans) et de 6,63 % (« lag time » de 20 ans). Le facteur confondant du tabac a été pris en compte. Ces résultats suggèrent une augmentation de la mortalité par cancer pour de faibles doses d'irradiation externe et une potentialisation de ces effets avec l'âge.

Des études antérieures (100) ont été faites dans le même laboratoire : celles-ci ne mettent pas en évidence d'augmentation de la mortalité pour les personnes plus jeunes. La relation entre l'irradiation et l'induction de cancers chez les plus jeunes est peut être plus faible. De plus, les salariés embauchés dans ces laboratoires sont sélectionnés au niveau de la santé par rapport à d'autres professions, ce qui peut entraîner une diminution des chiffres.

7.4.2. Discussion

Dans notre observation n°7, la patiente a présenté un adénocarcinome primitif lingulaire. Dans la littérature, le type histologique le plus souvent rencontré est le cancer bronchique à petites cellules. Pour les cancers broncho-pulmonaires par inhalation, les carcinomes épidermoïdes ont été le plus souvent mis en évidence.

La salariée a présenté le cancer à l'âge de 55 ans, ce qui correspond aux données épidémiologiques, puisque 75 % des patients ont entre 50 et 70 ans au moment du diagnostic.

Concernant l'exposition professionnelle, la salariée a d'abord été exposée :

- ◆ aux radiations externes, en particulier les rayons X pendant 18 ans. Elle tenait l'animal pendant les scopies et les radiographies qui étaient faites de façon pluri-quotidienne. Elle n'utilisait aucune radioprotection et ne portait pas de dosimètre. Les doses d'irradiation ont été probablement importantes car la patiente était directement soumise au rayonnement primaire et au rayonnement diffusé par l'animal.

D'après la littérature, les cancers broncho-pulmonaires sont très augmentés de façon significative après un traitement par radiothérapie. De plus, le risque augmente de façon proportionnelle avec la dose

Sur le plan professionnel, les études réalisées sur des salariés d'un laboratoire de recherche ne mettent pas en évidence d'augmentation significative de cancers du poumon. Cependant dans l'étude réalisée dans le « Los Alamos National Laboratory », la plupart des doses cumulées sont faibles et inférieures à 50 mSv.

Les données d'Hiroshima et de Nagasaki suggèrent une augmentation de cancers du poumon pour des doses supérieures à 200-500 mSv.

- ◆ La patiente a ensuite été soumise à des radiations internes pendant 7 ans : elle manipulait de façon occasionnelle du Soufre 35, de la Thymidine tritiée et du Chrome 51. Les cancers broncho-pulmonaires par inhalation sont reconnus sur le plan professionnel mais cette exposition ne semble pas responsable dans l'induction du cancer puisqu'elle a précédé de peu l'apparition du cancer. Or, on sait que le cancer du poumon survient après une période de latence de 20 ans en moyenne.

Il existe un autre facteur de risque majeur, le tabagisme qui est responsable de 90 % des cancers. La patiente présentait un tabagisme à 16 paquets-années et avait fumé pendant une période 16 ans. Elle avait arrêté le tabac depuis 20 ans.

D'après les données de la littérature, le tabac agit comme un facteur multiplicatif du risque relatif lié à l'exposition professionnelle aux radiations ionisantes. Concernant la patiente, l'association du tabac et de l'exposition chronique aux rayonnements ionisants a pu majorer la survenue de la pathologie. Cependant la preuve est difficile à apporter étant donné que le cancer du poumon induit par les rayonnements ionisants ne se distingue en rien des autres cancers.

8. Radioprotection

8. Radioprotection

8.1. Réglementation

En France, les normes de radioprotection sont définies par des décrets qui transposent les directives européennes, issues elles-mêmes de recommandations internationales tenant compte de l'évolution des connaissances scientifiques dans ce domaine.

8.1.1. Sur la plan international et européen

8.1.1.1. Structures

Une organisation spécifique émet des recommandations qui servent de référence : la Commission internationale de protection radiologique (CIPR). Elle édicte pour la première fois un système cohérent de principes en radioprotection qui a été adopté en 1958. La CIPR n'est pas un organisme de recherche ; ses recommandations émanent d'une synthèse de données scientifiques les plus récente, notamment celles publiées par deux organismes (3) :

- le Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des radiations ionisantes (UNSCEAR), organisme international qui a pour mission de recenser et analyser toutes les informations concernant les sources d'exposition de l'homme aux rayonnements ionisants ;
- le Comité BEIR (biological effects of ionizing radiation) de l'Académie des sciences des Etats-Unis qui procède à une analyse plus radiobiologique.

Les recommandations de la CIPR, publiées et numérotées, définissent les normes de radioprotection, mais n'ont aucun caractère réglementaire, puisque la CIPR est un organisme non gouvernemental. Elles servent de base à la définition de règles émises par de grandes organisations internationales (Organisation mondiale de la santé, Bureau international du travail, Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA)...). On citera plus particulièrement :

- l'établissement de normes fondamentales émises par l'AIEA, organisme intergouvernemental, créé en 1957 sous l'égide des Nations Unis ;
- l'élaboration des directives de la Communauté européenne de l'énergie atomique (dans le cadre du traité Euratom). Ces directives touchent la protection de la population générale et des travailleurs vis-à-vis du risque « rayonnements ionisants ». Elles constituent une obligation de résultats pour les Etats membres : chacun d'entre eux devra les transcrire dans sa réglementation nationale.

8.1.1.2. Principes fondamentaux de la CIPR

- ◆ La CIPR a publié en janvier 1977 (**CIPR 26**) des recommandations dont les normes de radioprotection se basent sur deux axes principaux (3) :
 - exclure les effets déterministes en maintenant les doses inférieures aux seuils connus ; ce principe permet une protection absolue ;
 - réduire les effets stochastiques pour lesquels il n'existe pas de seuil : les effets stochastiques ont un caractère probabiliste ; la notion de base est alors de réduire le risque à un niveau acceptable.

Apparaît ici la question de l'effet des faibles doses (0 à 0,2 Sv selon l'UNSCEAR). Aucun effet pathologique certain n'a pu être recensé en dessous de 0,2 Sv. Dans un souci de prudence, la CIPR a pris la décision de maximaliser le risque en l'extrapolant à partir de l'expérience de fortes doses. Elle a choisi plusieurs hypothèses :

- relation dose-effet de type linéaire : l'effet est proportionnel à la dose, même si elle est faible ;
- absence de seuil : dans cette hypothèse une dose infime peut statiquement provoquer un effet.

A partir de ces hypothèses, les normes de radioprotection sont fondées sur trois idées maîtresses :

- *justification* qui impose que toute utilisation des rayonnements ionisants soit évaluée au titre des avantages qu'elle apporte par rapport à la nuisance qui peut en résulter ;
- *optimisation* des moyens de radioprotection, basée sur la notion ALARA (« as low as reasonably achievable ») : elle doit permettre d'obtenir des doses ou des probabilités d'exposition aussi basses que possible, compte tenu des impératifs techniques et économiques ;
- *limitation* des doses individuelles selon les deux axes évoqués plus haut.

La CIPR 26 a ainsi publié des limites fondamentales : limite annuelle d'exposition de 5 mSv pour le public, de 50 mSv pour l'exposition professionnelle. Pour la peau et la plupart des organes exposés isolément, la limite d'exposition est de 50 mSv pour le public et de 500 mSv pour les travailleurs.

En cas d'exposition partielle (hétérogénéité des doses), la CIPR a défini l'*équivalent de dose efficace*, tenant compte de toutes les doses reçues par les différents tissus, après pondération, fondée sur la radiosensibilité des tissus et sur la plus ou moins grande gravité des effets pour ces tissus. L'équivalent de dose efficace est une dose fictive qui causerait le même dommage à l'organisme que la distribution réelle non uniforme des doses aux différents tissus. Les limites sont simultanément :

- un équivalent de dose efficace annuel maximal de 5 mSv pour l'exposition de la population générale et de 50 mSv pour l'exposition professionnelle ;
- un équivalent de dose annuel pour les différents tissus inférieur à 50 mSv pour l'exposition du public et inférieur à 500 mSv pour l'exposition professionnelle.

Parallèlement en cas d'exposition interne, les radioéléments ne se répartissent pas dans le corps de façon homogène (organes cibles). La CIPR a défini pour les travailleurs, selon les mêmes principes, une *limite annuelle d'incorporation* (LAI). Elle est établie de façon à ce que l'activité incorporée soit la plus faible des deux valeurs suivantes :

- celle qui entraîne un équivalent de dose engagé égal à 500 mSv pour l'organe le plus exposé ;
- celle qui entraîne une valeur de 50 mSv pour la somme des équivalents de doses engagés au niveau des différents organes ou tissus, pondérés des coefficients appropriés.

Des LAI, sont déduites des LDCA ou *limites dérivées de concentration dans l'air* : concentrations d'un radioélément dans l'air (en Bq par m³) qui, inhalées pendant les 2000 heures annuelles de travail, entraînent une exposition interne équivalente à la LAI.

- ◆ Devant l'évolution des connaissances scientifiques, la CIPR a publié en avril 1991 une mise à jour des recommandations (**CIPR 60**) (3).

Les principes fondamentaux de radioprotection restent identiques : justification, optimisation, limitation des doses et des risques. La CIPR 60 en élargit le champ et implique que :

- toutes les sources des rayonnements soient concernées, y compris l'exposition d'origine naturelle ;
- toutes les expositions soient considérées, y compris les expositions accidentelles.

L'optimisation s'applique aux sources. La limitation des doses et des risques s'applique à l'individu, elle induit la notion de contrainte de dose ou de risque (critère lié à l'individu, mais s'appliquant à une source, de façon à ne pas dépasser les limites de dose ou de risque en cas d'exposition à plusieurs sources).

Cette recommandation prend également en compte les cancers non létaux et les effets génétiques et conduit à de nouvelles limites :

- confirmation d'une dose vie inférieure à 1 Sv ;
- limite annuelle d'exposition à 20 mSv sur 5 années consécutives, sans dépasser 50 mSv par an.

Sur le plan des grandeurs dosimétriques, la dose absorbée D reste la valeur fondamentale (exprimée en grays). La CIPR a remplacé le facteur de qualité Q par un facteur de pondération W_R , la dose pondérée prenant le nom de dose équivalente (exprimée en sieverts). Le terme de dose effective (exprimée en sieverts) remplace l'équivalent de dose efficace, celle-ci est pondérée par les facteurs W_R et W_T (facteur de pondération relatif aux tissus et aux organes). Pour l'incorporation de radioéléments, la dose effective engagée correspond à l'intégrale de la dose effective sur 50 ans pour les travailleurs et sur 70 ans pour le public.

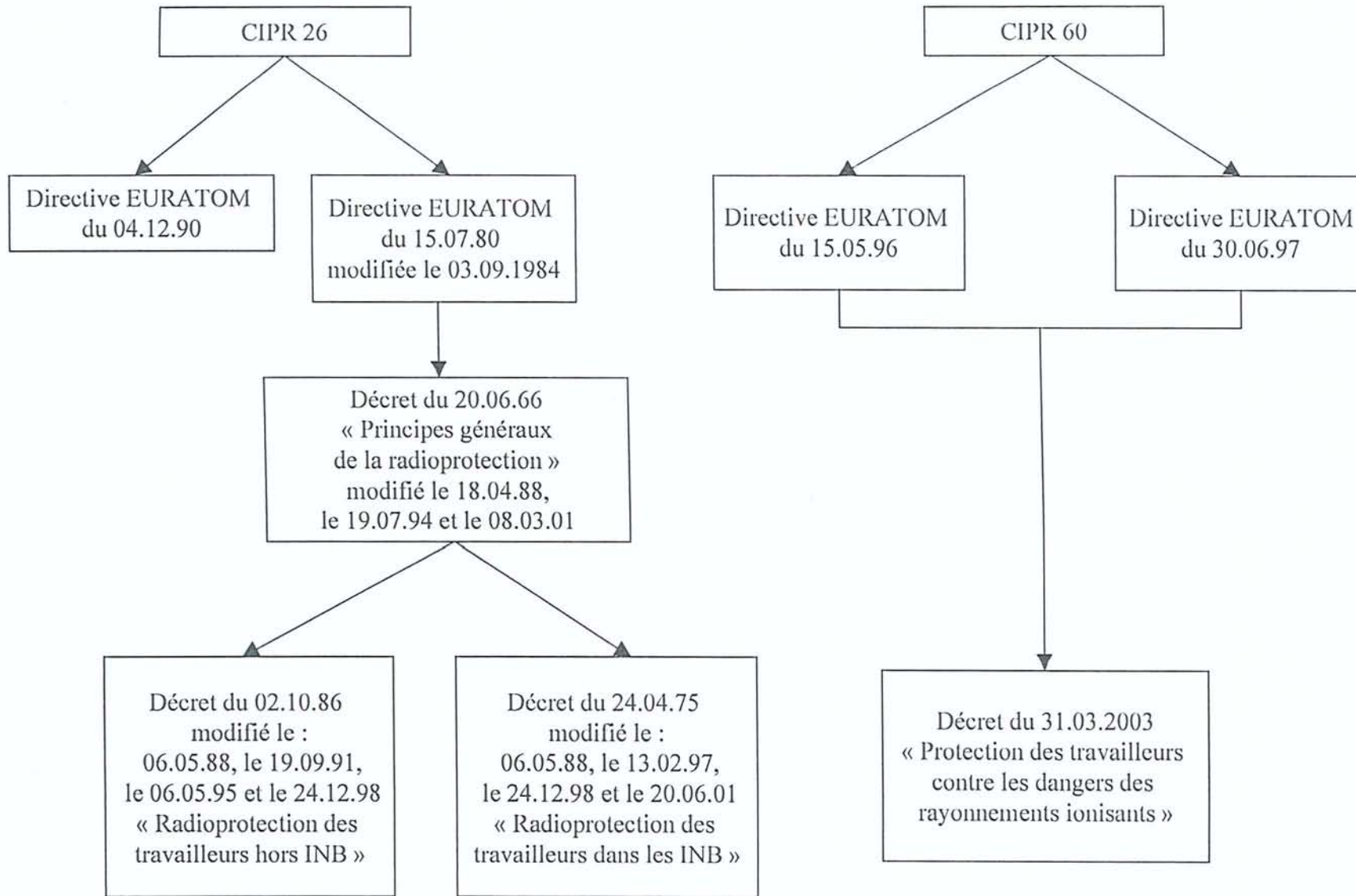
La classification des locaux et le suivi des travailleurs exposés que nous détaillerons ultérieurement font également l'objet de précisions :

- en zone contrôlée, la dosimétrie individuelle est obligatoire et s'ajoute à la surveillance de l'ambiance ; le contrôle de l'exposition doit faire l'objet d'un suivi rigoureux ;
- en zone surveillée, la dose peut être préévaluée, la surveillance de l'ambiance suffit, le suivi ne nécessite pas de procédures particulières.

international

euro péen

fran çais



8.1.1.3. Directives européennes (27) (25)

La directive 80/836 fixant les normes de base relatives à la protection sanitaire de la population et des travailleurs contre les dangers des rayonnements ionisants fut adoptée le 15 juillet 1980 et complétée un peu plus tard par la directive 84/467 du 3 septembre 1984. Ces directives dérivent directement des recommandations de la CIPR 26.

La directive 90/641 du 4 décembre 1990 traite la protection opérationnelle des travailleurs des entreprises extérieurs soumis à un risque d'exposition aux rayonnements ionisants au cours de leur intervention en zone contrôlée.

Suite à la mise à jour des recommandations de la CIPR 60 en avril 1991, deux nouvelles directives européennes ont été adoptées :

- la directive 96/29 EURATOM du 13 mai 1996 fixe les normes de base relative à la protection sanitaire de la population et des travailleurs contre les dangers résultant des rayonnements ionisants. Elle est basée sur les concepts de la CIPR 60 (voir ci-dessus) et concerne l'élargissement du champ d'application de radioprotection et des nouvelles limites d'exposition (20 mSv par an pour les travailleurs et 1 mSv par an pour le public).
- la directive 97/43 EURATOM du 30 juin 1997 concerne la protection sanitaire des patients et renforce les principes de justification, d'optimisation, limitation des doses et des risques.

8.1.2. Réglementation française (27) (60) (3)

8.1.2.1. Principaux textes législatifs et réglementaires

- **Le décret n°66-450 du 20 juin 1966**, modifié par les décrets n°88-521 du 18 avril 1988 et n°2001-215 du 8 mars 2001 concerne les principes généraux de protection contre les rayonnements ionisants et constitue le décret fondateur. Il fixe les doses limites d'exposition du public et des professionnels exposés aux rayonnements ionisants.
- **Le décret n°86-1103 du 2 octobre 1986**, modifié par les décrets n°91-963 du 19 septembre 1991, n°95-608 du 6 mai 1995 et n°98-1186 du 24 décembre 1998 est relatif à la protection des travailleurs contre les dangers des rayonnements ionisants (hors installation nucléaire de base).
- **Le décret n°75-306 du 28 avril 1975**, modifié par les décrets n°88-662 du 06 mai 1988, n°97-137 du 13 février 1997, n°98-1185 du 24 décembre 1998 et n°2001-532 du 20 juin 2001 concerne la protection des travailleurs contre les dangers des rayonnements ionisants dans les installations nucléaires de base (INB) ; ce dernier terme inclut les réacteurs, certains accélérateurs de particules, les installations où l'activité des sources détenues est très importante...
- L'arrêté du 1^{er} juin 1990 définit les méthodes de contrôle prévues par le décret n°86-1103 du 2 octobre 1986. Ces contrôles sont effectués par des organismes agréés et font l'objet de rapports écrits par type de source.

- L'arrêté du 28 août 1991 (6) approuve les recommandations faites aux médecins du travail assurant la surveillance médicale des travailleurs exposés aux rayonnements ionisants.
- L'arrêté du 2 octobre 1990 fixe la périodicité du contrôle des sources scellées, des installations des appareils générateurs électriques de rayonnements ionisants et de leurs dispositifs de protection.

8.1.2.2. Nouvelle réglementation

La transposition obligatoire des directives européennes Euratom 90/641,96/29 et 97/43 est à l'origine de la transformation actuelle de la réglementation française.

L'ordonnance n°2001-270 du 28 mars 2001 (10) fixe les mesures législatives nécessaires à la transposition des trois directives suscitées. Les modifications prévues par cette ordonnance ont été suivies par la publication des décrets d'application.

L'article 10 de l'ordonnance fonde un nouveau cadre législatif (art. L231-7-1 du CT) spécifique à la protection des travailleurs contre les dangers des rayonnements ionisants. Les dispositions de la dosimétrie opérationnelle deviennent applicables aux travailleurs non salariés et exposés aux rayonnements ionisants.

La nouvelle réglementation tend à renforcer la protection des travailleurs précaires (contrats à durée déterminée et contrats d'intérim), extérieurs ou non à l'installation nucléaire, afin de permettre leur suivi médical et d'éviter que de fortes expositions subies sur le lieu de travail ne conduisent à réduire leurs possibilités d'emploi futures.

Les décrets 98-1185 et 98-1186 du 24 décembre 1998 et leurs arrêtés d'application du 23 mars 1999 (10) complètent les décrets du 2 octobre 1986 modifié et du 28 avril 1975, et rendent la dosimétrie opérationnelle applicable à tous les travailleurs en zone contrôlée, y compris les personnels médicaux.

La mise en œuvre des dispositions de la dosimétrie opérationnelle repose sur l'employeur et le chef d'établissement de la zone contrôlée dans laquelle les travailleurs interviennent.

La dosimétrie opérationnelle est basée sur l'utilisation de dosimètres électroniques capables de donner des valeurs en temps réel et de générer des alarmes lorsque le débit de dose dépasse une valeur seuil. Ce type de dosimétrie est particulièrement intéressant dans le cadre de la radiologie interventionnelle, de la médecine nucléaire et de la curiethérapie.

L'IRSN, chargé de la gestion des données de la dosimétrie opérationnelle, réalise un système d'information national nommé SISERI (Système d'Information de la Surveillance des Expositions aux Rayonnements Ionisants) qui recueille l'ensemble des données dosimétriques des travailleurs.

Le décret n°2003-295 du 31 mars 2003 (46) relatif aux interventions en situation d'urgence radiologique et en cas d'exposition durable.

Le décret n°2003-296 du 31 mars 2003 (47) relatif à la protection des travailleurs contre les dangers des rayonnements ionisants abroge le décret du 28 avril 1975 à l'exception des articles 45-1, 45-2 et 45-3 ainsi que le décret du 2 octobre 1986 à l'exception des articles 41 à 46. Il transpose les Directives 90/29/EURATOM du 04 décembre 1990 et 96/29/EURATOM du 13 mai 1996.

- ◆ Il élargit le champ d'application de la radioprotection aux activités professionnelles avec la radioactivité naturelle et aux interventions en cas d'urgence radiologique. Il concerne également les activités nucléaires soumises à un régime d'autorisation ou de déclaration.
- ◆ Il renforce le principe ALARA en précisant que les expositions professionnelles individuelles et collectives doivent être maintenues aussi basses qu'il est raisonnablement possible, en dessous des limites fixées.
- ◆ Il précise les nouvelles limites d'exposition qui ne doivent pas être dépassées :
 - Les doses efficaces par exposition externe et interne pour les travailleurs exposés est abaissée à 20 mSv sur 12 mois consécutifs (avant la limite était de 50 mSv).
A noter que la somme des doses efficaces reçues par exposition externe et interne est fixée à 35 mSv sur 12 mois consécutifs sans qu'elle puisse dépasser 100 mSv sur 5 ans pendant une période transitoire du 01 avril 2003 au 31 mars 2005.
 - Les limites de doses équivalents ne sont pas modifiées : 150 mSv pour le cristallin et 500 mSv pour la peau et les extrémités,
 - La limite d'exposition entre la déclaration de la grossesse et le moment de l'accouchement est abaissée à 1 mSv comme la population générale alors qu'elle était de 10 mSv auparavant. Les femmes allaitant ne doivent pas être maintenues à un poste à risque d'exposition interne.
 - Afin de déterminer le suivi des travailleurs exposés, ceux-ci sont classés en catégorie A ou B par l'employeur. Les nouvelles limites dosimétriques induisent une révision de la classification des travailleurs dans ces catégories :
 - Catégorie A : travailleurs directement affectés à des travaux sous rayonnements ionisants, dont les conditions normales sont susceptibles d'entraîner une dose efficace supérieure à 6 mSv par an (auparavant 15 mSv) ou une dose équivalente supérieure aux trois dixièmes des limites annuelles d'exposition. Elle ne concerne pas les femmes allaitant, les femmes enceintes et les apprentis de 16 à 18 ans.
 - Catégorie B : travailleurs non directement affectés à des travaux sous rayonnements ionisants, dont les conditions normales ne peuvent être susceptibles d'entraîner une dose efficace supérieure à 6 mSv par an ou une dose équivalente supérieure aux trois dixièmes des limites annuelles d'exposition.
 - Les apprentis de seize à dix-huit ans ont une limite d'exposition de 6 mSv sur 12 mois consécutifs (auparavant 15 mSv par an).

Parallèlement, les zones de travail doivent être définies :

- zone contrôlée d'accès réglementé s'étendant aux lieux où l'exposition des travailleurs, dans les conditions normales de travail, est susceptible de dépasser 6 mSv par an ou les trois dixièmes des limites fixées (limite antérieure : 15 mSv).
- zone surveillée, où l'exposition des travailleurs, dans les conditions normales de travail, est susceptible de dépasser 1 mSv par an ou un dixième des limites fixées (limite antérieure : 5 mSv).

- ◆ L'exposition exceptionnelle (47) est une exposition qui dépasse ou risque de dépasser les limites réglementaires.

Elle est soumise à de nombreuses conditions :

- avis préalable du médecin du travail, du CHSCT,
- travailleurs uniquement de catégorie A volontaires, informés avec des moyens de dosimétrie individuelle,
- spécification sur le dossier médical,
- ne pas présenter d'inaptitude médicale,
- avoir été inscrit sur une liste préalablement établie,
- le travailleur ne doit pas avoir reçu dans les 12 mois qui précèdent une dose supérieure à l'une des valeurs limites annuelles.

Elle peut revêtir deux modalités :

- Exposition exceptionnelle préalablement justifiée : elle n'est possible qu'après l'obtention préalable d'une autorisation spéciale de l'inspecteur du travail. Elle ne doit pas excéder deux fois la valeur limite annuelle d'exposition soit 40 mSv (dose antérieure : 100 mSv).
- Situation d'urgence radiologique, celle-ci peut être admise exceptionnellement dans le cadre d'opérations de secours visant à sauver des vies humaines. Seuls des travailleurs volontaires et informés peuvent participer à ce type d'intervention. Ils sont classés en deux groupes (46) :

Le premier groupe est composé des personnels formant les équipes spéciales d'intervention technique, médicale ou sanitaire préalablement constituées. Ils peuvent recevoir une dose efficace de 100 mSv pendant la durée de leur mission ; elle est fixée à 300 mSv lorsque l'intervention est destinée à protéger des personnes.

Le second groupe est constitué de personnes intervenant au titre des missions relevant de leur compétence. Ils peuvent recevoir une dose efficace de 10 mSv, un dépassement pouvant être admis exceptionnellement afin de sauver des vies humaines.

Les femmes enceintes ou allaitant, les personnes âgées de moins de 18 ans ne peuvent accéder au groupe 1 ou 2 si le risque d'exposition aux rayonnements ionisants est avéré.

Les personnels doivent bénéficier de protections individuelles et être munis de dispositifs dosimétriques. Après une intervention, un bilan dosimétrique individuel et une surveillance médicale est effectuée ; celle-ci est consignée dans le dossier médical.

Les expositions antérieures sont prises en compte pour se prononcer sur l'aptitude. En aucun cas, la dose efficace totalisée sur la vie entière d'un intervenant ne doit dépasser 1 sievert.

Valeurs des limites d'exposition. Période transitoire : du 01 avril 2003 au 31 mars 2005.

Equivalents de doses efficace maximaux admissibles en mSv	Catégorie A				16-18 ans	Catégorie B	Public
	Conditions normales d'exposition		Expositions exceptionnelles				
			Expositions exceptionnelles préalablement justifiées	Situations d'urgence radiologique			
	1 an	3 dixièmes	1 an	Personnel formant les équipes spéciales 100 mSv 300 mSv (protéger des personnes) Mission relevant de leur compétence : 10 mSv	1 an	1 an	1 an
Corps entier	35	10,5	40		6	6	1
Peau	500	150	1000		150	150	50
Cristallin	150	45	300		50	45	15
Avant-bras, mains, pieds et chevilles	500	150	1000		150	150	50
Abdomen (grossesse déclarée)	8 mois						
	1						

Valeurs des limites d'exposition. Date d'application : 01 avril 2005

Equivalents de doses efficace maximaux admissibles en mSv	Catégorie A				16-18 ans	Catégorie B	Public
	Conditions normales d'exposition		Expositions exceptionnelles				
			Expositions exceptionnelles préalablement justifiées	Situations d'urgence radiologique			
	1 an	3 dixièmes	1 an	Personnel formant les équipes spéciales 100 mSv 300 mSv (protéger des personnes) Mission relevant de leur compétence : 10 mSv	1 an	1 an	1 an
Corps entier	20	6	40		6	6	1
Peau	500	150	1000		150	150	50
Cristallin	150	45	300		50	45	15
Avant-bras, mains, pieds et chevilles	500	150	1000		150	150	50
Abdomen (grossesse déclarée)	8 mois						
	1						

8.2. Mesures de prévention

8.2.1. Prévention technique collective

8.2.1.1. Mesures administratives

Une autorisation préalable est nécessaire pour toutes les sources, excepté les générateurs de rayons X utilisés par les services de médecine du travail ou de médecine préventive.

Dans tous les cas, une déclaration à l'Inspecteur de travail et à l'IRSN est obligatoire.

Les sources radioactives détenues doivent être notées sur un registre tenu à jour où sont consignés les moyens de contrôles, les modifications, leurs transformations, l'arrêt provisoire ou définitif de leur utilisation.

Il doit y avoir un document propre à chaque source qui est tenu à la disposition de l'inspecteur du travail et du CHSCT et doit indiquer les caractéristiques de la source, les modifications de l'appareillage, la nature et la durée moyenne mensuelle des travaux exécutés, la date des examens de contrôle.

Le matériel doit être agréé et renouvelé périodiquement. Des contrôles de radioprotection sont prévus avant la mise en service des installations, avec une périodicité qui dépend de la nature de la source (61).

8.2.1.2. Information et formation du personnel

La formation à la radioprotection des personnels exposés est organisée par l'employeur en liaison avec le CHSCT et la personne compétente en radioprotection. Cette formation est renouvelée au minimum une fois tous les trois ans.

L'information du personnel est prévue selon plusieurs dispositions :

- remise d'une notice d'information à tout travailleur affecté dans la zone contrôlée ou appelé à y pénétrer occasionnellement. Elle comprend les dangers présentés par l'exposition aux rayonnements ionisants et ceux du poste de travail, les moyens pour s'en prévenir ainsi que les méthodes de travail offrant les meilleurs garanties de sécurité, les mesures de contrôles techniques et médicales, les mesures d'hygiène, les résultats individuels d'exposition ;
- information des femmes sur les risques encourus par l'embryon ou le fœtus. Lorsque la grossesse est déclarée au médecin du travail, ce dernier devra alors rappeler cette information ;
- affichage d'un règlement intérieur en zone contrôlée rappelant aux travailleurs qu'ils sont tenus de respecter les consignes de sécurité, de porter les dispositifs, les équipements de protection individuels et les dosimètres individuels ;
- le nom et l'adresse du médecin du travail ainsi que le nom de la personne compétente en radioprotection doivent être affichés sur les lieux de travail. Les travailleurs doivent aussi être mis au courant de l'existence d'une zone contrôlée ;
- en cas de dépassement des limites d'exposition, les travailleurs intéressés, l'inspecteur du travail et le comité d'hygiène et de sécurité ont l'obligation d'être informés par l'employeur (2) ;

- l'employeur doit établir une fiche d'exposition comprenant la nature du travail et des rayonnements ionisants, les périodes d'exposition, les caractéristiques des sources émettrices.

8.2.1.3. Zones

Tout employeur détenteur d'une source de rayonnements ionisants doit définir autour de la source :

- une zone contrôlée s'étendant à tous les lieux de travail où l'exposition des travailleurs est susceptible, dans les conditions normales de travail, de dépasser les $3/10^{\text{ème}}$ de l'une des valeurs limites réglementaires. La zone contrôlée comprend nécessairement les locaux suivants : le sas-vestiaire pour le personnel permettant la séparation des vêtements de ville et de ceux du travail, les salles d'exams et de mesure, les salles réservées à l'attente, la salle d'injection et l'installation de stockage des déchets et des effluents liquides radioactifs. La zone contrôlée doit faire l'objet d'une signalisation appropriée ;
- une zone surveillée dans laquelle l'exposition des travailleurs est susceptible, dans les conditions normales de travail, de dépasser les $1/10^{\text{ème}}$ mais inférieure aux $3/10^{\text{ème}}$ de l'une des valeurs limites réglementaires.

A l'intérieur de ces zones, les sources doivent être signalées par un balisage adéquat (3) .



Exemples de signalisations utilisées en radioprotection
 Source: P. Fraboulet - La réglementation de la radioprotection (60)

8.2.1.4. *Personne compétente en radioprotection*

L'employeur est tenu de désigner une personne compétente en radioprotection connaissant le fonctionnement des appareils ou l'utilisation des sources et les dangers qu'ils représentent. Pour être désigné personne compétente en radioprotection, le salarié concerné doit faire partie de l'entreprise et doit avoir suivi la formation spécifique dans un organisme agréé.

C'est à cette personne qu'incombe, par délégation, la responsabilité de l'organisation de la protection du personnel. Elle doit procéder :

- à l'analyse périodique des postes de travail exposés,
- veiller au respect des mesures de protection contre les rayonnements ionisants,
- recenser les situations ou les modes de travail susceptibles de conduire à des expositions exceptionnelles ou accidentelles des travailleurs,
- participer à la formation à la sécurité des travailleurs exposés,
- proposer le classement des salariés en catégorie A ou B.

8.2.1.5. *Protection contre l'exposition*

Avant l'emploi de toute source radioactive, la conception des locaux doit dans la mesure du possible être étudiée afin de protéger au mieux les travailleurs :

◆ Exposition externe

- blindage des sources,
- mise en place d'obstacles physiques délimitant un périmètre de franchissement interdit autour de la source pendant son fonctionnement,
- utilisation d'écrans mobiles et d'appareils de manipulation à distance appropriés à la nature du rayonnement,
- épaisseur et choix des matériaux des murs d'enceinte en fonction du type de rayonnement.

◆ Exposition interne

- confinement des sources,
- ventilation appropriée avec filtration des locaux de travail qui doit être contrôlée régulièrement,
- les locaux doivent avoir des surfaces lisses et imperméables recouvertes d'un revêtement facilement décontaminable,
- hottes ou enceintes fermées sous dépression ; des sorbonnes ou plus rarement des boîtes à gants sont utilisées lors des manipulations,
- port de tenues spéciales si la nature des manipulations l'exige,
- le stockage des radioéléments est isolé des lieux de contamination dans un local fermé à clé et balisé. Les isotopes doivent être conservés dans des récipients adaptés et correctement étiquetés. Ces locaux font l'objet de contrôles réguliers de non contamination (2).

8.2.1.6. Contrôles d'ambiance

Ils ont lieu avant la mise en service de la source et seront renouvelés périodiquement, au minimum une fois par mois par un service compétent en radioprotection et une fois par an par un organisme agréé qui recherchera une éventuelle contamination. En cas de modification de l'appareillage ou de dépassement des doses, c'est la personne compétente qui devra réaliser les contrôles. Les résultats seront consignés dans un document qui sera remis à l'IRSN (47).

Les contrôles d'ambiance devront être effectués régulièrement par des mesures au plus près du point d'émission, soit par des prélèvements continus pendant la durée de travail, soit par des prélèvements instantanés. Le contrôle technique est réalisé avec des mesures de débits de dose externe en cas d'exposition externe et mesure de la concentration de l'activité de l'air en cas d'exposition interne.

La recherche de contamination des locaux, des plans de travail ou de matériels se fait à l'aide d'appareillage de mesure divers adaptés aux rayonnements émis par la source : scintillateurs, compteurs type Geiger-Müller (3) ...

8.2.1.7. Traitement des déchets radioactifs

La collecte et l'évacuation des déchets et effluents doivent être soigneuses et parfaitement quantifiées. Les déchets solides sont recueillis dans des poubelles spécifiques étiquetées.

8.2.2. Prévention technique individuelle

8.2.2.1. Principes

La protection des travailleurs passe par la réduction des doses.

Elle repose sur 4 grands principes :

- Le temps d'exposition doit être le plus court possible : utiliser des sources non scellées à période courte. Une rotation du personnel peut être effectuée aux postes les plus exposés.
- La distance d'éloignement à la source doit être la plus importante possible : utilisation d'appareillages de manipulation à distance, pinces à long manches.
- Les écrans de protections interposés entre la source et l'opérateur doivent être adaptés au rayonnement :
 - rayons alpha : on utilise un écran mince en mica, en aluminium, en cuivre ou en argent
 - rayons bêta : on utilise un écran en plexiglas ou en aluminium.
 - rayons X : les écrans de plomb sont utilisés.
- Les vêtements de protection doivent être adaptés au rayonnement en cause. Ils sont fournis par l'employeur et comprennent principalement gants, blouses, surbottes, protège-thyroïde, paravent, tablier de plomb. Les masques respiratoires sont d'utilisation exceptionnelle. Les vêtements de protection doivent être retirés sur les lieux de travail.

Des méthodes de travail spécifiques permettent également une meilleure sécurité : répétitions à « froid » des manipulations les plus dangereuses, utilisation d'appareils de chargement à distance des sources en curiethérapie.

Le règlement intérieur doit spécifier qu'il est interdit de fumer, de boire ou de se maquiller dans les lieux de manipulation des radioéléments. Aucun pipetage de la bouche n'est autorisé (2).

8.2.2.2. Contrôle du personnel

Deux définitions sont à connaître (47) :

- ◆ La dosimétrie interne comprend l'ensemble des méthodes et des techniques permettant de mesurer la dose interne. Elle repose sur des examens anthropogammamétriques et des analyses radiotoxicologiques.
- ◆ La dosimétrie externe comprend l'ensemble des méthodes et des techniques permettant de mesurer la dose externe. On en distingue deux types :
 - la « dosimétrie passive ou Dosifilm » où la dose externe peut être mesurée à partir d'appareils (dosimètres) à lecture différée et reproductible. Le salarié porte l'appareil sur une durée d'un mois ; il est ensuite développé dans la première quinzaine du mois suivant.
 - la « dosimétrie opérationnelle » où la dose externe peut être mesurée à partir de dosimètres lus en temps réel.

Après manipulation de source non scellée, le contrôle du personnel est réalisé par une mesure de la contamination externe au niveau des mains, du visage, des pieds et des vêtements avant de quitter les lieux de travail à l'aide d'appareils appropriés.

Chaque travailleur susceptible d'intervenir en zone surveillée ou contrôlée fait l'objet d'un suivi dosimétrique régulier par des mesures individuelles :

- ◆ de l'exposition externe : dosimétrie passive par IRSN ou un organisme agréé,
- ◆ de l'exposition interne à la demande du médecin du travail (16) :
 - L'anthropogammamétrie est une méthode de comptage externe de l'activité totale contenue dans l'organisme d'un individu en cas d'exposition aux émetteurs gamma.
 - Les analyses radiotoxicologiques sont effectuées par une mesure de la radioactivité des excréta : urines de 24 heures le plus souvent, selles mais également après mouchage lorsque les radioéléments ne sont que des émetteurs alpha ou bêta.
 - Ces analyses sont effectuées par l'IRSN, un organisme agréé ou le service médical du travail.

Tout travailleur intervenant en zone contrôlée doit faire l'objet en plus d'un suivi par dosimétrie opérationnelle qui est communiqué à l'IRSN. La dosimétrie opérationnelle est imposée depuis le décret n°2003-296 du 31 mars 2003.

Les résultats sont communiqués au salarié, au médecin de travail et à la personne compétente en radioprotection (47).

8.2.3. Prévention médicale

L'arrêté du 28 août 1991 fixe les recommandations faites aux médecins du travail chargés de la surveillance des travailleurs soumis aux rayonnements ionisants, mais également les critères d'aptitude pour les travailleurs des catégories A et B.

L'aptitude médicale des salariés exposés aux rayonnements ionisants comporte des aspects spécifiques, nécessitant une connaissance très précise du poste de travail (radioéléments en cause, activités utilisées, conditions de manipulation, risques d'exposition externe ou interne...).

La fiche d'aptitude doit indiquer la date de l'étude du poste de travail et le date de la dernière mise à jour de la fiche d'entreprise.

Le médecin du travail constitue un dossier individuel avec :

- le double de la fiche d'exposition,
- les dates et les résultats des suivis dosimétriques,
- les dates et les résultats des examens complémentaires.

Ce dossier doit être conservé au minimum 50 ans après la fin de l'exposition aux rayonnements ionisants (ancienne réglementation : 30 ans) (47).

Les travailleurs en catégorie A et B sont soumis à une surveillance médicale spéciale. Ils bénéficient d'un examen médical au moins une fois par an pour les travailleurs de catégorie B et au minimum tous les 6 mois pour les travailleurs de catégorie A. Cet examen médical comprend un examen clinique général et, selon la nature de l'exposition, un ou plusieurs examens complémentaires qui seront laissés à l'appréciation du médecin du travail (47).

8.2.3.1. Surveillance médicale

Elle permet de prévenir et de dépister toute affection susceptible d'être en relation avec une exposition aux rayonnements ionisants, et de déceler toute contre-indication médicale de l'affection ou au maintien à un poste exposé.

Elle comporte :

- un examen avant l'affectation au poste de travail,
- des examens périodiques dont la fréquence est laissée à l'appréciation du médecin du travail, mais ils doivent être réalisés au moins une fois par an.

Les éléments médicaux concernant l'aptitude et les résultats des examens complémentaires doivent être consignés dans un dossier médical spécial annexé au dossier médical individuel pour les travailleurs de catégorie A.

Pour faciliter sa tâche, le médecin dispose :

- de la fiche de nuisance mentionnant la nature des travaux effectués, la nature des rayonnements, la durée des périodes de travail exposant aux rayonnements,
- de la fiche d'irradiation mentionnant les résultats et les suivis dosimétriques,

- de la carte individuelle du suivi médical. Celle-ci est personnelle et comprend un volet détachable qui doit être adressé à l'IRSN par le médecin du travail au moment de la délivrance. Elle est valable pour une période de trois ans, date à laquelle elle doit être renouvelée (10).

◆ Interrogatoire

Il recherche les antécédents professionnels et médicaux pouvant faire courir un risque particulier au travailleur :

- affections familiales héréditaires,
- maladies ayant un retentissement hématologique, affection néoplasique ou toute autre maladie pouvant être l'origine d'une contre-indication médicale à l'exposition aux rayonnements ionisants,
- l'estimation des équivalents de dose antérieurement reçus pour des raisons médicales ou professionnelles.

◆ Examen clinique

L'arrêté du 28 août 1991 décrit en détail la conduite de l'examen clinique orientée en fonction du risque. Le médecin recherchera en particulier (6) :

- En cas d'exposition externe :
 - une affection d'ordre hématologique,
 - une affection ophtalmologique.
- En cas d'exposition interne, il y a lieu de rechercher des affections entraînant :
 - Une rétention importante des radionucléides au niveau des voies respiratoires : les affections respiratoires ayant un retentissement fonctionnel constituent un motif d'inaptitude. L'asthme et la tuberculose ne constituent pas une contre-indication formelle.
 - Une pénétration des contaminants par la peau : eczéma, psoriasis, plaies cutanées... mais il faut tenir compte du siège, de l'étendue et du caractère évolutif des lésions pour se prononcer sur l'aptitude.
 - Une pénétration des contaminants par les voies digestives : la rupture de la solution de continuité digestive telle que la maladie de Crohn, la rectocolite hémorragique, l'ulcère évolutif... constitue un motif d'inaptitude.
 - Un ralentissement de l'élimination des radionucléides absorbés : les affections hépatiques ou rénales (avec un retentissement dans leur rôle de détoxication et d'excrétion) conduisent à une inaptitude médicale.
 - Une rétention de poussières ou des difficultés de décontamination au niveau des oreilles : les perforation tympanique, les otorrhées et la sinusite chronique peuvent entraîner une inaptitude temporaire ou définitive.

Devant les risques de contamination et/ou d'exposition externe, le médecin s'assurera de l'absence de cataracte avant la première affectation au risque, même si elle ne constitue pas systématiquement un motif d'inaptitude. Quant aux opacités cristalliniennes, même multiples, elles ne constituent pas une contre-indication contrairement à ce qui était stipulé dans l'arrêté du 23 avril 1968 (abrogé par celui du 28 août 1991). Il en est de même pour le glaucome opéré ou non.

L'apparition de troubles cutanés imputables aux rayonnements ionisants constituent bien entendu une cause d'inaptitude au moins temporaire.

Aucune maladie cardio-vasculaire, ni affection du système nerveux, ne constitue de contre-indication spécifique à l'exposition aux rayonnements ionisants. La thyroïde fera l'objet d'une attention particulière si le salarié doit manipuler des radioéléments à tropisme thyroïdien (Iode, Technétium).

◆ Examens complémentaires spécialisés (6)

Leur nature et leur périodicité sont laissés à l'appréciation du médecin du travail en fonction des différents critères définis par les caractéristiques du poste de travail et le salarié lui-même (modalités d'exposition, type de radioéléments manipulés, âge, état général...).

En particulier, l'examen hématologique n'est plus systématique. Cependant, « il mérite d'être maintenu au moins à l'embauchage et lorsque le médecin l'estime nécessaire », d'autant plus que plusieurs maladies professionnelles indemnifiables sont des affections hématologiques (anémie, leucopénie, thrombopénie, leucémie).

En cas d'anomalie de la NFS, des examens complémentaires doivent être réalisés pour en déterminer le mécanisme et la cause.

L'arrêté du 28 août 1991 précise les valeurs de référence de la numération formule sanguine. Le médecin du travail est alors seul juge pour apprécier l'aptitude du salarié lorsque les valeurs de la formule sanguine s'écartent de ces références (2).

En cas de nécessité de port de masque ou d'une autre protection respiratoire, l'examen pourra être complété par des explorations fonctionnelles respiratoires.

Une radiographie pulmonaire doit être pratiquée avant l'exposition au travail ; elle sera renouvelée à la demande du médecin du travail (pas de caractère systématique obligatoire).

◆ Examens exceptionnels (6)

Avant toute exposition exceptionnelle, l'avis du médecin du travail est exigé. Des examens complémentaires préalables peuvent alors être demandés. Après toute exposition exceptionnelle préalablement justifiée, ou surexposition, le médecin effectue un bilan, avec notamment une dosimétrie biologique qui viendra compléter les données de la dosimétrie physique. Il peut avoir recours à l'IRSN. Le médecin doit alors se prononcer, en fonction des résultats de l'examen clinique, des examens complémentaires médicaux et dosimétriques, sur l'aptitude du salarié à son poste et fixer éventuellement les modalités de l'exposition ultérieure.

A l'issue de la consultation, le médecin du travail remet une carte individuelle de suivi médical (définie par l'arrêté du 31 juillet 1991) à tout travailleur de catégorie A ou B ; cette carte est enregistrée au niveau national. Elle comporte un volet destiné à l'intéressé où figure le paraphe du médecin du travail et un volet adressé par le médecin du travail au SCRIP (Service Central de Protection contre les Rayonnements ionisants).

8.2.3.2. Surveillance de l'exposition individuelle

Chaque travailleur susceptible d'intervenir en zone surveillée ou contrôlée fait l'objet d'un suivi dosimétrique régulier par des mesures individuelles (6) :

- de l'exposition externe comprenant la dosimétrie passive,
- de l'exposition interne comprenant un examen anthropogammamétrique et une analyse radiotoxicologique.

L'anthropogammamétrie doit être effectuée après une douche et dans des vêtements propres autres que ceux du travail.

Les prélèvements biologiques pour les examens radiotoxicologiques doivent permettre l'évaluation de l'élimination journalière ; les examens urinaires doivent porter sur un prélèvement de vingt-quatre heures.

Tout travailleur intervenant en zone contrôlée fait l'objet d'un suivi par dosimétrie opérationnelle qui est communiqué à l'IRSN.

Les résultats sont communiqués au salarié, au médecin du travail mais également à la personne compétente en radioprotection dans le but d'une évaluation prévisionnelle.

Les résultats sont inscrits sur la fiche d'exposition du dossier médical spécial.

En cas de résultat anormal, le médecin doit en rechercher l'origine (confirmer l'authenticité) et alors effectuer le bilan clinique et paraclinique nécessaire, de façon à pouvoir se prononcer sur l'aptitude ultérieure du salarié concerné.

S'il s'agit d'un salarié de catégorie B dont l'exposition occasionnelle atteint les trois dixièmes des limites annuelles, le médecin peut soit émettre un avis d'inaptitude temporaire, soit classer la personne en catégorie A, avec le suivi que cela implique et sous réserve que soient réunies l'ensemble des conditions d'aptitude.

En conclusion, l'aptitude des salariés exposés aux rayonnements ionisants comporte des aspects spécifiques. L'arrêté du 28 août 1991 distingue plusieurs cas :

- « le travailleur est apte à son poste de travail l'exposant aux rayonnements ionisants (catégorie A et B), aptitude qui peut être limitée à moins de 6 mois,
- le travailleur est apte au travail l'exposant aux rayonnements ionisants sous certaines réserves : le médecin du travail est alors fondé à proposer à l'employeur soit des modifications du poste de travail, soit d'autres postes de travail ;
- le travailleur est inapte temporairement ou définitivement au travail l'exposant aux rayonnements ionisants : comme dans le cas précédent, le médecin est amené à faire des propositions. Toutes les possibilités de changement d'emploi temporaire ou définitif doivent alors être examinées au sein de l'entreprise, notamment par la mutation dans une zone d'exposition à un niveau moindre.

- Cas particulier : à l'issue d'une visite médicale, le salarié peut être mis en observation tout en étant maintenu à son poste de travail. Cette mise en observation permet de différer la décision relative à l'affectation aux travaux sous rayonnements ionisants et de disposer ainsi du recul nécessaire dans les cas difficiles. Si les anomalies s'accroissent, le médecin peut être amené à proposer l'inaptitude aux travaux sous rayonnements ionisants. Si les anomalies disparaissent, le médecin peut décider de la levée de la mise en observation et donc de l'aptitude à un poste exposé aux rayonnements ionisants. »

8.3. Conduite à tenir chez la femme enceinte

L'exposition radiologique de la femme enceinte engendre très souvent des inquiétudes disproportionnées par rapport au risque couru et des conduites inadaptées.

La CIPR 84 a publié des recommandations explicites, solidement étayées scientifiquement, qui vont à l'encontre de la psychose qui s'est parfois installée dans le milieu professionnel. Elle pose comme préambule des conditions extrêmement rigoureuses pour l'exposition du fœtus, considéré comme une personne du public. Cette dose est limitée à 1 mGy après la déclaration de la grossesse, dose correspondant au nouveau décret n°2003-296.

- « La responsabilité première de la protection du fœtus incombe à la femme elle-même qui doit déclarer sa grossesse à son employeur dès qu'elle en a la confirmation ».
- La limitation de la dose ne signifie pas qu'il soit nécessaire que la femme enceinte évite totalement le travail sous rayonnement ionisant ou avec des substances radioactives ou qu'il lui soit interdit de pénétrer dans les zones surveillées ou contrôlées.
- La reconnaissance du « droit à l'inquiétude », bien que la femme soit informée des faibles risques, est inscrite dans le texte. Le médecin du travail peut alors, à la demande de la travailleuse, demander un changement de poste sans avoir à justifier sa décision.
- Il est également possible d'affecter la femme à un poste pour lequel l'exposition ambiante est plus faible. En radiologie diagnostique, cela peut se traduire par le transfert de l'opératrice de la radiologie interventionnelle à la tomodensitométrie ou tout autre zone où l'exposition au rayonnement diffusé est moindre. Dans les services de médecine nucléaire, une opératrice enceinte peut se voir imposer des limites en terme de temps passé en radiopharmacie ou à manipuler des solutions d'Iode radioactif. En radiothérapie, lorsqu'il s'agit de manipuler des sources scellées, les opératrices enceintes peuvent être amenées à ne pas participer à la curiethérapie manuelle.
- Du point de vue de la radioprotection, il est tout à fait possible que la femme reste à son poste de travail à condition de pouvoir estimer de manière raisonnablement fiable la dose fœtale et que celle-ci ne dépasse pas la dose recommandée de 1 mGy après la déclaration de grossesse. Il faut également évaluer l'environnement de travail afin de garantir que l'exposition accidentelle à de fortes doses est improbable.

De plus, il faut savoir que la limite de dose recommandée concerne la dose fœtale et n'est pas directement comparable à la dose mesurée sur un dosimètre individuel. Selon les études, les doses fœtales ne dépasseraient pas 25 % de la dose lue sur le dosimètre individuel.

Ces recommandations, basées sur de nombreuses données scientifiques, doivent servir de référence et permettre d'informer le personnel concerné. Il n'empêche pas que la recherche de grossesse et sa prise en compte doivent rester une préoccupation constante en milieu du travail (34) (33).

Quant aux femmes allaitantes, elles ne doivent pas travailler à un poste à risque d'exposition interne.

8.4. Conduite à tenir en cas d'accident d'irradiation

Nous allons voir la conduite à tenir face aux accidents radiologiques. Les accidents nucléaires de grande ampleur ne seront pas envisagés dans ce chapitre.

La conduite à tenir face à un accident d'irradiation dépend du type d'irradiation. Il faut donc distinguer au moment de l'accident s'il s'agit d'une irradiation externe globale ou localisée ou d'une radio-contamination externe ou interne (14) (26).

8.4.1. Irradiation externe globale

Il n'existe pas de risque d'irradiation pour le personnel soignant lors de la pratique des soins d'un irradié.

L'urgence est diagnostique : l'essentiel est d'apprécier la dose reçue et les dommages biologiques associés car la conduite thérapeutique et le pronostic en dépendent. Ce diagnostic de gravité repose sur les données recueillies lors :

- ◆ De l'interrogatoire, des signes cliniques et leur évolution dans le temps : le vomissement précoce est un signe de gravité très important, il est indispensable de le rechercher.
- ◆ Des examens complémentaires :
 - La numération formule sanguine doit être effectuée le plus précocement possible à moins de trois heures après l'irradiation. Les lymphocytes sont les cellules les plus radiosensibles : la pente de chute des lymphocytes est directement proportionnelle à la dose reçue.
 - Le caryotype avec la recherche d'aberrations chromosomiques doit être effectué systématiquement et précocement. Il doit parvenir à l'IRSN sous 24 heures. Il s'agit de l'examen le plus sensible (de l'ordre de 0,5 Gy en urgence) et permet d'estimer la dose reçue même rétrospectivement.
- ◆ La prescription des autres examens est à moduler en fonction des conseils de l'IRSN selon l'ampleur de l'accident : typage HLA, phénotypage GR, EEG, amylasémie, FSH plasmatique.
- ◆ On peut connaître la dose d'irradiation tout simplement par les dosimètres que portent les personnes irradiées.

La conduite à tenir s'effectue en fonction de la dose d'irradiation :

- Aucun signe clinique : dose < 1 Gy mais suspicion d'irradiation globale. Surveillance médicale comprenant un examen clinique complet, une numération formule sanguine associée à celle des plaquettes réalisée au plus tôt puis à J1, J3, J21 et J30 et un caryotype.
- Au moins un des signes cliniques du syndrome d'irradiation aiguë : dose > 1 Gy. Il s'agit d'une irradiation globale grave.

Transport sanitaire vers un service spécialisé. Les prélèvements seront pratiqués au plus tôt et comprennent une numération formule sanguine associée à celle des plaquettes, une recherche d'aberrations chromosomiques et un typage HLA. La numération formule sanguine sera contrôlée si possible toutes les 3 à 6 heures pendant 48 heures.

8.4.2. Irradiation externe localisée

Il n'y a pas de geste thérapeutique d'urgence à faire.

Les symptômes s'installant progressivement dans le temps, il y a lieu dès la période initiale de procéder à des examens paracliniques qui permettront un diagnostic précoce et anticipé.

Parallèlement est menée la reconstitution dosimétrique qui est réalisée par un service spécialisé (IRSN).

La prescription des examens paracliniques est à moduler avec le conseil de l'IRSN ou du service spécialisé, en fonction de l'aspect lésionnel :

- thermographie réalisée dans les 24 premières heures,
- IRM,
- échographie à 20 MHz,
- capillaroscopie,
- examens biologiques pour déterminer la part de l'exposition globale.

8.4.3. Contamination radioactive

La prise en charge de ces victimes est étroitement liée aux circonstances de l'accident et à la nature du radio-élément en cause.

Le personnel soignant doit se protéger afin d'éviter une contamination secondaire : le port de vêtements type vêtements chirurgicaux est suffisant (masque, gants, surbotte, combinaison ou blouse). En fin de soins, le personnel sera contrôlé à l'aide d'une sonde détectrice et si la tenue est contaminée, celle-ci sera récupérée dans des sacs en plastique et lavée dans un centre spécialisé. S'il existe une contamination externe, le personnel sera traité.

8.4.3.1. Radiocontamination externe

Elle est secondaire à des dépôts de particules radioactives sur la peau et est limitée à celle-ci.

Il s'agit d'un incident bénin si une élimination des corps radioactifs par lavage est réalisée au plus tôt. Lorsqu'ils sont nécessaires, la réanimation et les gestes d'urgence priment sur la décontamination.

Les étapes de la décontamination sont les suivantes :

- protéger les conduits auditifs avec des bouchons d'oreille, les yeux, les narines et la bouche,
- déshabillage,
- stockage des vêtements contaminés dans des sacs plastiques afin d'éviter la dissémination de la contamination,
- lavage doux à l'eau du robinet et au savon, à répéter deux ou trois fois.
- rinçage abondant,

- séchage soigneux,
- contrôle par une sonde de détection pour vérifier l'efficacité de la décontamination,
- rhabillage avec des vêtements non souillés,
- recueillir si possible les eaux de lavage sinon les rejeter avec les eaux usées.

8.4.3.2. Radiocontamination interne

Elle est secondaire à l'incorporation de radioéléments par inhalation, inoculation (plaie ou brûlure contaminée) ou ingestion. Le risque dépend du ou des radionucléides en cause, de leur métabolisme naturel dans l'organisme et de leur quantité. Une action rapide s'impose pour éviter la fixation du radioélément sur son organe cible. L'efficacité du traitement décroît en général rapidement avec le temps.

◆ Inhalation

- Il faut décontaminer le visage avec de l'eau du robinet et du savon, puis les narines et les oreilles. Pour la décontamination du corps, faire déshabiller le sujet, lui faire prendre une douche complète. Protéger les yeux, narines, bouche, oreilles lors du lavage des cheveux.
- En cas de présence d'Iode radioactif, il faut prévenir le risque de contamination de la glande thyroïde. Il faut donc la saturer par une quantité suffisante d'Iode stable ; ainsi l'Iode radioactif ne pénétrera pas dans la glande thyroïde.
- En présence de certains radionucléides, en particulier les émetteurs alpha, on utilisera un aérosol de DTPA.
- En présence de Césium, le traitement est l'administration orale de bleu de Prusse.

◆ Plaie ou brûlure contaminée

- En cas de suspicion d'éléments chélatables, utiliser une ampoule de DTPA sur la plaie. Faire inhaler des capsules de DTPA à l'aide d'un turbo-inhaleur.
- En cas de présence d'Iode radioactif, donner de l'Iode stable le plus tôt possible.

Il est nécessaire de contacter l'IRSN qui conseillera sur la conduite à tenir.

◆ Ingestion

Une contamination digestive est toujours présente en cas d'inhalation de corps radioactif.

- lors d'une contamination digestive isolée par un radioélément non résorbable, un laxatif doux aidera à l'élimination,
- lors d'une contamination par un radioélément absorbé par le tube digestif, il faut mettre en œuvre un traitement spécifique.

◆ Surveillance de la contamination interne

On pourra suivre l'élimination de radionucléides en s'aidant d'examens radiotoxicologiques des urines et des selles et d'examens anthropogammamétriques.

8.5. Surveillance médicale post-professionnelle

Elle prend une place importante en ce qui concerne les rayonnements ionisants.

Les personnes ayant été exposées à un risque cancérigène peuvent bénéficier d'une surveillance médicale particulière qui ouvre la voie à un dépistage précoce de la maladie professionnelle correspondant à ce risque. Si la personne est inactive, demandeur d'emploi ou retraitée, elle peut bénéficier de la surveillance médicale post-professionnelle conformément au décret n° 93-644 du 26 mars 1993. Elle est prise en charge par la caisse primaire d'assurance maladie ou l'organisme spécial de sécurité sociale et comprend un examen médical tous les deux ans avec libre choix du praticien. L'intéressé doit fournir une attestation d'exposition remplie par l'employeur et le médecin du travail pour pouvoir en bénéficier (27).

8.6. Réparation

Le tableau de maladie professionnelle concernant les affections provoquées par les rayonnements ionisants a été créé en 1931, puis mis à jour en 1984 pour le tableau n°6 du régime général de la sécurité sociale et créé en 1955 et mis à jour en 1985 pour le tableau n°20 du régime agricole.

Le tableau regroupe les affections dites déterministes, qui surviennent dès lors que l'exposition est suffisamment importante et prolongée. Ces affections concernent la partie supérieure du tableau. Dans la partie inférieure, on retrouve les affections dites stochastiques dont l'apparition est probabiliste et survient plusieurs années après l'exposition. C'est dans ce cadre que l'on trouve les leucémies, les cancers broncho-pulmonaires par inhalation et les sarcomes osseux. Il n'y a donc que trois types de cancer reconnus comme maladies professionnelles.

Cette liste extrêmement limitée à ce jour pourrait être mise à jour prochainement par la Commission des maladies professionnelles du Conseil supérieur de la prévention des risques professionnels.

Deux affections font actuellement l'objet de discussions pour leur éventuelle inclusion au sein du tableau : les cancers de la thyroïde de l'adulte et les cancers du sein. D'autres cancers seraient susceptibles d'être retenus comme cancers professionnels, mais la preuve de leur lien de causalité avec les rayonnements ionisants manque. En effet, il s'agit de pathologies au caractère multifactoriel, de faible incidence, dans un bruit de fond naturel élevé où il existe un manque notable de données épidémiologiques (27).

Le nombre de cancers professionnels liés aux rayonnements ionisants reconnus est très faible. Les maladies professionnelles de ce tableau ne représentent que 0,3 % des maladies professionnelles reconnues en France chaque année soit moins d'une vingtaine de cas. Cependant, ils ne reflètent probablement pas l'ensemble des cas qui sont susceptibles d'être

reconnus. En effet pour qu'une affection puisse être reconnue d'origine professionnelle, il faut bien entendu en faire la demande.

Un tiers de ces affections professionnelles sont des leucémies. Les affections reconnues sont sévères, car 25 % d'entre elles sont mortelles dans des délais assez brefs (27).

Pour les affections du tableau, il y a présomption d'origine quelle que soit la catégorie A ou B à laquelle a appartenu le travailleur pendant sa vie professionnelle, même si sa dosimétrie pendant toute sa carrière est restée faible, même si les examens radiotoxicologiques sont restés normaux pendant cette période. L'affection est systématiquement présumée d'origine professionnelle sans qu'il y ait besoin d'en établir la preuve.

Dès lors qu'il s'agit d'une pathologie ne figurant pas dans le tableau, les règles de radioprotection étant fondées sur l'hypothèse de linéarité du risque en fonction de la dose, tout travailleur exposé aux rayonnements ionisants devrait pouvoir demander la présomption d'imputabilité du cancer qu'il présente. Le Comité Régional de Reconnaissance des Maladies Professionnelles (CRRMP) est alors saisi (27).

6

RÉGIME GÉNÉRAL

Affections provoquées par les rayonnements ionisants

Date de création : 4 janvier 1931

Dernière mise à jour : 26 juin 1984
(décret du 22 juin 1984)

Désignation des maladies	Délai de prise en charge	Liste indicative des principaux travaux susceptibles de provoquer ces maladies
Anémie, leucopénie, thrombopénie ou syndrome hémorragique consécutifs à une irradiation aiguë.	30 jours	Tous travaux exposant à l'action des rayons X ou des substances radioactives naturelles ou artificielles, ou à toute autre source d'émission corpusculaire, notamment : Extraction et traitement des minerais radioactifs ; Préparation des substances radioactives ; Préparation de produits chimiques et pharmaceutiques radioactifs ; Préparation et application de produits luminescents radifères ; Recherches ou mesures sur les substances radioactives et les rayons X dans les laboratoires ; Fabrication d'appareils pour radiothérapie et d'appareils à rayons X ; Travaux exposant les travailleurs au rayonnement dans les hôpitaux, les sanatoriums, les cliniques, les dispensaires, les cabinets médicaux, les cabinets dentaires et radiologiques, dans les maisons de santé et les centres anticancéreux ; Travaux dans toutes les industries ou commerces utilisant les rayons X, les substances radioactives, les substances ou dispositifs émettant les rayonnements indiqués ci-dessus.
Anémie, leucopénie, thrombopénie ou syndrome hémorragique consécutifs à une irradiation chronique.	1 an	
Blépharite ou conjonctivite.	7 jours	
Kératite.	1 an	
Cataracte.	10 ans	
Radiodermites aiguës.	60 jours	
Radiodermites chroniques.	10 ans	
Radio-épithélite aiguë des muqueuses.	60 jours	
Radiolésions chroniques des muqueuses.	5 ans	
Radionécrose osseuse.	30 ans	
Leucémies.	30 ans	
Cancer broncho-pulmonaire primitif par inhalation.	30 ans	
Sarcome osseux.	50 ans	

20

RÉGIME AGRICOLE

Affections provoquées par les rayonnements ionisants

Date de création : 17 juin 1955

Dernière mise à jour : 15 janvier 1985
(décret du 31 décembre 1984)

Désignation des maladies	Délai de prise en charge	Liste indicative des principaux travaux susceptibles de provoquer ces maladies
Anémie, leucopénie, thrombopénie ou syndrome hémorragique consécutifs à une irradiation aiguë.	30 jours	Travaux exposant à l'action des rayonnements ionisants, notamment : - travaux effectués dans les services médicaux, ou médico-sociaux, ou dans les laboratoires ; - travaux concernant la conservation et l'analyse de produits agricoles divers.
Anémie, leucopénie, thrombopénie ou syndrome hémorragique consécutifs à une irradiation chronique.	1 an	
Blépharite ou conjonctivite.	7 jours	
Kératite.	1 an	
Cataracte.	10 ans	
Radiodermites aiguës.	60 jours	
Radiodermites chroniques.	10 ans	
Radio-épithélite aiguë des muqueuses.	60 jours	
Radio-lésions chroniques des muqueuses.	5 ans	
Radio-nécrose osseuse.	30 ans	
Leucémies.	30 ans	
Cancer broncho-pulmonaire par inhalation.	30 ans	
Sarcome osseux.	50 ans	

Conclusion

Conclusion

L'utilisation des rayonnements ionisants se développe dans le milieu professionnel, en particulier dans le domaine industriel où les applications sont très diversifiées. Malgré cela, le nombre de pathologies radio-induites est en régression en raison de l'amélioration de la radioprotection et d'une meilleure connaissance des effets des rayons par leurs utilisateurs.

Cependant, nous constatons à travers les observations présentées, que des améliorations sont nécessaires, notamment sur la formation et l'information des travailleurs. En effet, la plupart des pathologies présentées par les patients auraient pu être réduites s'il y avait eu une meilleure connaissance des professionnels et un respect des règles de radioprotection. En outre, le médecin du travail peut jouer un rôle important dans la prévention : il est chargé de la surveillance médicale des travailleurs et de leur information sur les dangers liés à l'exposition à ces rayons.

Des questions subsistent sur le développement de la radiologie interventionnelle et le risque de pathologies radio-induites chez les praticiens. La prévention n'est pas toujours facile à adapter, c'est pourquoi une réflexion est en cours sur les moyens à mettre en place.

La plupart des pathologies radio-induites n'ont aucune spécificité par rapport à celles survenant dans la population générale, ce qui pose des problèmes dans la démarche diagnostique. Il est souvent difficile d'établir avec certitude le lien entre l'exposition professionnelle et la maladie. Pour les affections faisant partie du tableau de maladie professionnelle n°6, il y a présomption d'origine alors que pour les autres pathologies, il faut apporter la preuve.

Le problème essentiel demeure pour l'exposition aux faibles doses où les études actuelles n'ont pas mis en évidence d'effets néfastes des rayons sur l'organisme mais ne permettent pas de les exclure avec certitude. Devant ces données insuffisantes, des études épidémiologiques sont en cours et seront importantes dans les années à venir pour l'évaluation du risque lié aux faibles doses reçues de manière prolongée. De plus, le décret n°2003-296 du 31 mars 2003 relatif à la protection des travailleurs contre les dangers des rayonnements ionisants, a abaissé les limites annuelles d'exposition à 20 mSv et a renforcé le principe ALARA basé sur la justification, l'optimisation et la limitation de l'utilisation des rayonnements ionisants afin de réduire au maximum le risque d'effets secondaires.

Bibliographie

- (1) ABADIA G. et GIMENEZ C. Effets des rayonnements ionisants. Encyclopédie médico-chirurgicale (Paris-France), toxicologie-pathologie professionnelle, 1994, tome II, 16-510-A-10, 8 p.
- (2) ABADIA G. et GIMENEZ C. Exposition aux rayonnements ionisants et radioprotection. Documents pour le médecin du travail, n°51, 3^e trimestre 1992.
- (3) ABADIA G. et GIMENEZ C. Radioprotection. Encyclopédie médico-chirurgicale (Paris-France), toxicologie-pathologie professionnelle, 1994, tome III, 16-700-A-10, 6 p.
- (4) Académie des Sciences. Problèmes liés aux effets des faibles doses des radiations ionisants. Rapport n°34. Paris : Lavoisier, 1995, 116 p.
- (5) Analyse de données : 50 ans d'accidents d'irradiations. Travail et Sécurité, avril 1999, 1 p.
- (6) Arrêté du 28 août 1991 approuvant les termes des recommandations faites aux médecins du travail assurant la surveillance médicale des travailleurs exposés aux rayonnements ionisants. Journal Officiel, 2 octobre 1991, 6 p.
- (7) ARTIGNAN S., CONSO F. et HAZEBROUCQ V. Radiodermites en radiologie interventionnelle (doses reçues aux mains, dépistage et réparation). J Radiol, 2003, vol. 84, pp. 317-319.
- (8) ARTIGNAN S., CONSO F., PERDEREAU B., et al. Une radiodermite chronique en radiologie interventionnelle. Arch. Mal. Prof., 2003, vol. 64, n°2, pp. 106-109.
- (9) AUBERT B. ROCHE A. Irradiation des opérateurs en radiologie interventionnelle. Concours Médical, 1996, vol. 35, n° supplément, pp. 56-57.
- (10) AUBERT B., BEAUVAIS H., BIAU A. et al. Radioprotection. Santé, Radioactivité et rayonnements ionisants, 2003, pp. 51-66.
- (11) BARTHEZ P. Effet biologique des radiations ionisantes et radioprotection. Radiobiologie – Radioprotection, 2000 – 2001, pp. 1-14.
- (12) BASSET-SEGUIN N., RENAUD-VILMER C. et VEROLA O. Carcinomes spino-cellulaires. Encyclopédie médico-chirurgicale (Paris-France), dermatologie, 2002, 98-625-A-10, 9 p.
- (13) BERTIN M. Bilan des irradiations accidentelles. Concours médical, juin 1991, suppl. n°22, vol. 113, pp. 1912-1913.
- (14) BERTIN M. Conduite à tenir par le médecin en cas d'irradiation accidentelle. Concours médical, supplément n°22, vol. 113, juin 1991, pp. 1914-1921.
- (15) BERTIN M. Effets génétiques des radiations. Concours médical, juin 1991, suppl. n°22, vol. 113, pp. 1895-1896.
- (16) BIAU A. Surveillance dosimétrique des travailleurs. Le manipulateur d'imagerie médicale et de radiothérapie, septembre 1999, n° spécial, pp. 31-32.
- (17) BLANC D. Abrégés de physique nucléaire. Paris : Masson, 1993, 213 p.

- (18) BLANC D., PORTAL G., BARTHE J., et al. Les rayonnements ionisants : détection, dosimétrie, spectrométrie. 2nd ed. Paris, Milan, Barcelone : Masson, 1997, 135 p.
- (19) BLISS MARY, BOWYER SONYA M. Experiences and management of pregnant radiation workers at Pacific Northwest National Laboratory. Chemical Health and Safety, 2001 may-june, pp. 6-8.
- (20) BOICE J. D., DOODY M. M. Breast cancer among radiologic technologists. JAMA, 1996 August 7, vol. 276, n°5, pp. 369-370.
- (21) BOICE JOHN D. Radiation and Non-Hodgkin's Lymphoma. Cancer Research, October 1, 1992, suppl., vol. 52, pp. 5489-5491.
- (22) BONNAFOUX-CLAVERE A., CLAVERE P. et BONNETBLANC J.M. Radiodermite aiguë et chronique. Ann Dermatol Venereol, 2003, vol. 130, pp. 565-568.
- (23) BONNIN A., CONVARD J. P., FOOS J. et al. Applications des rayonnements ionisants. Santé, Radioactivité et rayonnements ionisants, 2003, pp. 13-22.
- (24) BOULAY-VENISSE M.H., GAURON C., SOULA M.C. Risque rayonnements ionisants dans le milieu médical : enquête en Ile de France. Arch. Mal. Prof., juin 2002, 63, pp. 3-4.
- (25) BOURGUIGNON M. Doctrine de la radioprotection. Rayonnements ionisants et radioprotection. Le manipulateur d'imagerie médicale et de radiothérapie, septembre 1999, n° spécial, pp. 11-12.
- (26) BOURGUIGNON M., CHAMBRETTE V., FLURY-HERARD A. et al. Incidents et accidents. Santé, radioactivité et rayonnements ionisants, 2003, pp. 67-84.
- (27) BOURGUIGNON M., CHATELLON DE VATHAIRE C., CASSAGNOU H. et al. Le cas particulier des radiations ionisantes. In : Cancers professionnels. Tome I. Paris : Margaux Orange, 2000, pp. 265- 274.
- (28) BRESSON Y. Médecine nucléaire et radiobiologie. Paris : Hermann, 1990, 379 p
- (29) CARDIS E. Données épidémiologiques et estimations de risques radio-induits. Rev Epidemiol Sante Publique, 2002, 50, pp. 27-39.
- (30) CIPRIANI J. et HASMONAY H. Otiqne, ondes, atome et noyau : cours, applications et exercices. Vuibert : Paris, 1997, 195 p.
- (31) CONEJO-MIR J.S., MORENO J.C. et CAMACHO F. Cryosurgical treatment of professional chronic radiodermatitis. Dermatol Surg, 1997 Jun, vol. 23, n°6, pp. 483-486.
- (32) CORDOLIANI Y.S. Effets pathologiques des rayonnements ionisants : les effets déterministes. Feuillet de radiologie, 2003, vol. 43, n°1, pp. 80-86.
- (33) CORDOLIANI Y.S., FOEHRENBACH H. Grossesse et exposition médicale. Feuillet de radiologie, 2003, vol. 43, n°2, pp.154-159.
- (34) CORDOLIANI YVES-SEBASTIEN. Grossesse et rayons : retour à la raison. Bulletin de la Société Française de Radiologie, février 2002, p.3.
- (35) COSSET J.M. Cancers radio-induits : le point en 1997. Cancer/Radiother, 1997, vol. 1, pp. 823-835.

- (36) COSSET J.M. et HOPPE Richard T. Pulmonary late effects after treatment of Hodgkin's disease. In :Hodgkin's Disease. Ed Philadelphia : P.M. Mauch, 1999, pp. 633-645.
- (37) COSSET J.M. Radiothérapie : notions radiobiologiques, principaux effets secondaires. Impact internat, avril 1998, pp. 297-307.
- (38) COSSET J.M. Risques à long terme ; faibles doses. 2002, Institut Curie, membre du comité 3 de la Commission Internationale de Protection Radiologique.
- (39) COSSET J.M., PERDEREAU B., DUBRAY B. et al. The 1951-98 experience of the Paris Institut Curie Radiopathology Unit : a preliminary report. J. Radiol. Prot., 1999, vol. 19, n°4, pp. 293-304.
- (40) COUASNON O., BERGOT D., CHAMPION M. et al. Bilan des expositions professionnelles aux rayonnements ionisants sur la période de 1995 – 1999. Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire, Service de Protection Radiologique des Armées et Aptus, 2000, 13 p.
- (41) CROUAIL P., RITTORE D. LEFAURE C, CEPN. Vers une meilleure connaissance aux rayonnements ionisants. Travail et Sécurité, février 2002, pp. 28-33.
- (42) CROUAIL P., RITTORE D., PERDEREAU B. et al. Radiological Incidents in Industrial Gammagraphy : Analysis of 20 French Cases and lessons Learned. IRPA, 2000, 4 p.
- (43) DE BROUWER C. Radioprotection et tératogenèse. Arch. Mal. Prof., 1998, vol. 59, n°2, pp. 91-102.
- (44) DECOLLOGNE VINCENT. Les radiodermites chroniques après cathétérisme cardiaque : A propos de quatre cas. Nancy : Université Henri Poincaré 1, 1999, 131 p.
- (45) Décret n°2003-270 du 24 mars 2003 relatif à la protection personnes exposées à des rayonnements ionisants à des fins médicales et médico-légales et modifiant le code de la santé publique. Journal Officiel, 02 avril 2003, n°78.
- (46) Décret n°2003-295 du 31 mars 2003 relatif aux interventions en situation d'urgence radiologique et en cas d'exposition durable et modifiant le code de la santé publique (deuxième partie : décrets en Conseil d'Etat). Journal Officiel, 02 avril 2003, n°78, 6 p.
- (47) Décret n°2003-296 du 31 mars 2003 relatif à la protection des travailleurs contre les dangers des rayonnements ionisants. Journal Officiel, 02 avril 2003, n°78, 21 p.
- (48) DOLLO R. Principales unités utilisées en radioprotection. . Le manipulateur d'imagerie médicale et de radiothérapie, septembre 1999, n° spécial, pp. 5-8.
- (49) DOMONT A. et OZENNE J. Les professions exposées aux rayonnements ionisants. La Gazette Médicale, tome 101, n°17, pp.20-23.
- (50) DOYLE PAT, MACONOCHIE NOREEN, ROMAN EVE et al. Fetal death and congenital malformation in babies born to nuclear industry employees: report from the nuclear industry family study. The Lancet, october 14, 2000, vol. 356, pp. 1293-1999.
- (51) DRAY N., CADOR B., TURNER G. et al. Maladies professionnelles et exposition aux radiations ionisantes : affections déclarées au régime général de 1985 à 1995 en Ile de France. Arch. Mal. Prof., 1999, vol. 60, n°1, pp. 29-35.

- (52) DUCASSOU D. Notions de physique nucléaire – Le médecin et le risque nucléaire. La revue du praticien, 15 mars 1995, suppl. n°6, pp. 11-14.
- (53) DUMONTET C., COIFFIER B. Lymphomes non hodgkiniens agressifs. Encyclopédie médico-chirurgicale (Paris-France), Hématologie, 1998, tome II, 13-016-A-20, 7 p.
- (54) DURAND A., ESCANYE J.M., NAOUN A. Biophysique : rappels de cours, exercices et QCM corrigés. Ed Ellipses : Paris, 2003, 312 p.
- (55) EMERY ROBERT J. Embryo/fetal radiation protection: a possible model for comprehensive occupational reproductive health programs. Chemical Health and Safety, 2001 may-june, pp.15-20.
- (56) FERRIEU C., BALLESTER B., MATHIEU J. et al. Flow cytometry analysis of gamma radiation induced Epstein-Barr virus reactivation in lymphocytes. Radiat Res, 2003 feb, vol. 159, n°2, pp. 268-273.
- (57) FISHER C. Les radioéléments et leurs utilisations. Paris : Eyrolles, mai 1980, 531 p. (Commissariat à l'énergie atomique).
- (58) FOEHRENBACH H., CORDOLIANI Y.S. Effets biologiques des rayonnements ionisants. Feuillet de radiologie, 2002, vol. 42, n°6, pp. 517-523.
- (59) FOLEY S.J., PAY A., HOWELL G.P. et al. Metastatic squamous cell carcinoma of the hand and review of the literature. JR Army Corps ? 1995 Jun, vol 141, n°2, pp. 102-104.
- (60) FRABOULET P., MAUSOLEO F. La réglementation de la radioprotection. Le manipulateur d'imagerie médicale et de radiothérapie, septembre 1999, n° spécial, pp. 18-20.
- (61) GAMBINI J. et R. GRANIER R. Manuel pratique de radioprotection. 2nd ed. Cachan-France : Editions Médicales Internationales, 1997,430 p.
- (62) GAURON C. Rayonnements ionisants : évaluation du risque professionnel en milieu médical. Arch. Mal. Prof., juin 2002, 53, pp. 3-4.
- (63) GELAS J.M. Mines d'uranium. In : Les cancers professionnels, tome II. Paris : Margaux Orange, p 23-35.
- (64) GERAUT C. et DRENO B. Cancers cutanés. In : Cancers professionnels. Tome I. Paris : Margaux Orange, 2000, pp.485-490.
- (65) GERAUT C. et DRENO B. Rayonnements ionisants. In : Cancers professionnels. Tome I. Paris : Margaux Orange, 2000, pp.53-64.
- (66) GIRINSKY T., COSSET J.M. Les effets tardifs pulmonaires et cardiaques induits par les radiations ionisantes seules ou en association à la chimiothérapie. Cancer/Radioth 1997 ; vol. 1, pp. 735-742.
- (67) GOTTLÖBER P., KRÄHN G., BEZOLD G., et al. Basal cell carcinomas occurring after accidental exposure to ionizing radiation. British Journal of Dermatology, 1999, 141, pp. 350-392.
- (68) HARTWELL S.W., HUGER W. et PICKRELL K. Radiation dermatitis and radiogenic neoplasms of the hands. Ann Surg, 1964, vol. 160, pp. 828-834.
- (69) HERBELET G. Exemples d'exposition du personnel. Le manipulateur d'imagerie médicale et de radiothérapie, septembre 1999, n° spécial, pp. 27-30.

- (70) HUBERT D. Effets cancérigènes des radiations. Concours médical, juin 1991, suppl. 22, vol. 113, pp. 1891-1894.
- (71) INRS. La sécurité dans l'emploi des radionucléides en sources non scellées. Paris : Laboureur et Cie, 1978, 383 p.
- (72) IPSN. Doses reçues par les agents SNCF lors des transports nucléaires. Travail et Sécurité, juin 1999, 1 p.
- (73) JONES P., SMEESTERS P., WAMBERSIE A. Radiologie et radioprotection en médecine dentaire : Réglementation et recommandations pratiques (deuxième partie). Rev. Belge Méd. Dent., 1991 vol. 46, n°1, pp.31-52.
- (74) LABRUNE M. Conduite à tenir chez la femme enceinte. Le manipulateur d'imagerie médicale et de radiothérapie, septembre 1999, n° spécial, p. 35.
- (75) LACOTTE-THIERRY L., GUILHOT F. Leucémie myéloïde chronique : diagnostic, évolution, pronostic. La revue du Praticien, 1999, vol. 49, pp. 339-343.
- (76) LAGROT F., MUSSINI-PONTPELLIER J. et STREIT R. Etude histopathologique et évolutive des radiodermes chroniques professionnelles des doigts. Sem hôp Paris, 1970, vol.46, n°13, pp.866-878.
- (77) LALLEMAND J. Effets biologiques de l'irradiation et conséquences pathologiques. Concours médical, juin 1991, suppl. n°22, vol. 113, pp. 1886-1890.
- (78) LALLEMAND J. Effets tératogènes des radiations. Concours médical, juin 1991, suppl. n°22, vol. 113, pp. 1897-1899.
- (79) LALLEMAND J. Les accidents d'irradiation dans le monde - Le médecin et le risque nucléaire. La revue du praticien, 1995, vol. 44, pp. 57-61.
- (80) LALLEMAND J. Les effets des rayonnements ionisants. Rayonnements ionisants et radioprotection. Le manipulateur d'imagerie médicale et de radiothérapie. Septembre 1999, n° spécial, pp. 9-10.
- (81) LE GUEN B., BERARD P. et LAROCHE P. Thorium. Encyclopédie médico-chirurgicale (Paris-France), toxicologie-pathologie professionnelle, 2000, tome I, 16-010-A-10, pp. 1-9.
- (82) LIBOUTON P., CAROYER J.M., BUYSE P. Maladies professionnelles et rayonnements ionisants : affections reconnues de 1932 à 1997 en Belgique. Arch. Mal. Prof., 2001, 62, n°2, pp. 108-114.
- (83) MAS A. Travail dans les mines. Encyclopédie médico-chirurgicale (Paris-France), toxicologie-pathologie professionnelle, 1990, tome III, 16-539-D-10, 2 p.
- (84) MASSE R. Cancérogenèse et rayonnements ionisants. Revue de l'ACOMEN, 1998, vol. 4, n°4, pp. 280-286.
- (85) MAZERON J.J. et LOCOCHE T. Techniques d'irradiation des cancers. Ed Paris : Vigot, 1992, 331 p.
- (86) MEYNIEL G. Effets des radiations sur l'homme – Le médecin et le risque nucléaire. La revue du praticien, 15 mars 1995, suppl n°6, pp. 15-18.
- (87) MONNIER A. Effets tardifs de la radiothérapie externe sur la glande thyroïde. In : Cancer/Radiother, 1997, 1, pp. 717-31.

- (88) MONNIER J.P., TUBIANA J.M. Pratique des techniques du radiodiagnostic, 2nd ed. Paris, Milan, Barcelone : Masson, 1994, 353 p.
- (89) MULLER L.P., SUFFNER J., WENDA K. et al. Radiation exposure to the hands and the thyroid of the surgeon during intramedullary nailing. *Injury*, 1998, vol. 29, n°6, pp. 461-468.
- (90) NOCEIRA M., BAUDIN E. et SCHLUMBERGER M. Cancer thyroïdien. In : *Cancers professionnels. Tome I*. Paris : Margaux Orange, 2000, pp.631-639.
- (91) PALLARD B., DUJARDIN C. et RUFFENACH J.C.. Où sont les déchets radioactifs en France ? Rapport de l'Observatoire national de l'ANDRA, Condé-sur Noireau (France) : Corlet, 2002, 611 p.
- (92) PASCAL-SUISSE P., LEVOT J., SOLACROUP J.C. et al. Précis de radiobiologie. Paris : Vigot, 1989, 169 p.
- (93) Personnes compétentes en radioprotection. Documents pour le médecin du travail, 2^{ème} trimestre 1998, n°74, pp. 171-177.
- (94) PLANEL H. Effets biologiques du rayonnement cosmique. Encyclopédie médico-chirurgicale (Paris-France), toxicologie-pathologie professionnelle, 1992, tome II, 16-506-A-20, 6 p.
- (95) Protection des travailleurs contre les dangers des rayonnements ionisants dans les installations nucléaires de base, texte officiel. Documents pour le médecin du travail, 2^{ème} trimestre 1998, n°74, pp. 187-198.
- (96) QUOIX E. Cancers broncho-pulmonaires primitifs : épidémiologie, anatomie pathologique, étiologie, diagnostic, évolution, traitement. *La revue du Praticien*, 1994, vol. 44, pp. 2237-2243.
- (97) RADVANYI P. Quelques pages d'histoire – Le médecin et le risque nucléaire. *La revue du praticien*, 15 mars 1995, suppl. n°6, pp. 7-10.
- (98) Rayonnements ionisants. *Journal Officiel*, 26 décembre 1998. Documents pour le médecin du travail, 4^{ème} trimestre 1998, n°76, pp. 395-398.
- (99) RIBRAG V., BOSQ J. Lymphomes de Burkitt. . Encyclopédie médico-chirurgicale (Paris-France), Hématologie, 2002, tome II, 13-016-A-50, 9 p.
- (100) RICHARDSON D.B., WING S. Radiation and mortality of workers at oak ridge natioanl laboratory : positive associations for doses received at older ages. *Environmental Health Perspectives*, 1999 August, vol. 107, n°8, pp. 649-656.
- (101) ROSEAU E. Radiodermites des mains. *Nouv Presse Med.*, 4 nov 1972 , vol. 1, n°39, p. 2616.
- (102) ROULEAU P. Formation des médecins radiologistes et des médecins des autres spécialités à la radioprotection. *Concours Médical*, 1996, vol. 35, n° supplément, pp. 52-53.
- (103) ROY P., COLEMAN M.P. Epidémiologie des leucémies aiguës lymphoïdes. *Rev. Epidémiol. et Santé Publ.*, 1992, vol. 40, pp. 323-334.
- (104) SCHMUTZ J.L., GRANEL F., REICHERT-PEINETRAT S. Radiodermites après cathétérisme cardiaque. *La Presse Médicale*, 11 décembre 1999, vol. 38, n°39, pp. 2168-2173.

- (105) SONT W.N., ZIELINSKI J.M., ASHMORE J.P. et al. Respond to « Studies of workers exposed to low doses of radiation ». *American Journal of Epidemiology*, 2001 febr 15, vol. 153, n°4, pp. 323-324.
- (106) SPIRA A., BOUTOU O. Rayonnements ionisants et santé : mesure des expositions à la radioactivité et surveillance des effets sur la santé. Rapport aux ministres de l'Environnement de la Santé, 1997, 179 p.
- (107) STEWART A.M., KNEALE G.W. Relations between age at occupational exposure to ionising radiation and cancer risk. *Occupational and Environmental Medicine*, 1996, 53, pp. 225-230.
- (108) TUBIANA M. L'effet cancérigène éventuel des faibles doses de radiations ionisants et le rapport de l'Académie des Sciences. *Médecins et rayonnements ionisants*, décembre 1996, n°13, pp. 3-8.
- (109) TUBIANA M. Les effets cancérigènes des faibles doses de radiations. *Cancer/Radiother*, 1999, vol. 3, pp. 203-214.
- (110) TUBIANA M., A. BONNIN A. et CARDE C. Actualités en radiobiologie et en radioprotection. Clamecy (France) : Nucléon, février 2001, 368 p.
- (111) TUBIANA M., DUTREIX J., WAMBERSIE A. *Radiobiologie*. Paris : Hermann, 1986, 291 p.
- (112) WAMBERSIE A. Radiologie et radioprotection en médecine dentaire : effets biologiques résultant d'une exposition aux rayonnements ionisants (première partie). *Rev. Belge Méd. Dent.*, 1991 vol. 46, n°1, pp.9-29.
- (113) WAMBERSIE A., SMEESTERS P. et FRÜHLING J. Exposition aux rayonnements ionisants : effets radiobiologiques et pathogénie. *Rev Med Brux*, 1996, vol. 17, pp. 27-38 et 75-84.
- (114) WARIN A.P. Radiodermatitis of the hands in a dental practitioner. *Clin Exp Dermatol*. 1979 Mar, vol. 4, n°1, pp.129-132.
- (115) WIGGS L.D., JOHNSON E.R., COX DE VORE C.A. et al. Mortality through 1990 among white male workers at the Los Alamos National Laboratory : considering exposures to Plutonium and external ionizing radiation. *Health Physics*, 1994 December, vol. 67, n°6, pp. 577-588.
- (116) ZERBIB J.C. Accidents radiologiques : les retours d'expériences. *Annales de l'Association belge de Radioprotection*, 1994, vol. 19, n°4, pp. 621-643.
- (117) ZERBIB J.C. Accidents sur irradiateurs : le retour d'expériences. *Annales de l'Association belge de Radioprotection*, 1994, vol. 19, n°4, pp. 645-663.



VU

NANCY, le 15 mars 2004

Le Président de Thèse

Professeur G. PETIET

NANCY, le 7 mai 2004

Le Doyen de la Faculté de Médecine

Professeur P. NETTER

AUTORISE À SOUTENIR ET À IMPRIMER LA THÈSE

NANCY, le 12 mai 2004

LE PRÉSIDENT DE L'UNIVERSITÉ DE NANCY I

Professeur J.P. FINANCE

RÉSUMÉ DE LA THÈSE

L'exposition professionnelle aux rayonnements ionisants est une nuisance relativement récente. Les cancers pulmonaires par inhalation rencontrés dans les mines d'Uranium ont été les premières pathologies radio-induites décrites à la fin du XIX^{ème} siècle, puis sont survenues les radiodermites et les leucémies chez les physiciens et les radiologistes peu de temps après la découverte des rayons X (1895).

Actuellement, en France, plus de 240000 travailleurs peuvent être soumis à une exposition aux rayonnements ionisants. Les applications médicales de ces rayons emploient environ 140000 personnes. L'industrie nucléaire compte environ 80000 professionnels travaillant dans les centrales nucléaires ou dans les établissements intervenant dans les opérations du cycle du combustible. Les autres industries et la recherche emploient plus de 27000 personnes.

Ce travail s'articule autour de sept cas de pathologies professionnelles liées aux rayonnements ionisants. Des rappels historiques et les bases physiques de ces rayons sont d'abord abordés, avant d'étudier leurs effets biologiques et cliniques. Le bilan des professions exposées est alors dressé par l'auteur, plus particulièrement dans les secteurs industriel, médical et de la recherche.

Les sept observations cliniques sont ensuite étudiées. Les cinq premières concernent des cas de radiodermites aiguës ou chroniques, pour lesquelles les moyens de prévention pouvant être mis en place sont abordés. Pour les deux dernières observations, l'auteur discute du lien entre la pathologie et l'exposition professionnelle.

Enfin, la réglementation en matière de radioprotection et la prévention technique et médicale sont exposées.

PROFESSIONAL DISEASE RELATED TO IONIZING RADIATION : ABOUT SEVEN CASES

THÈSE : MÉDECINE DU TRAVAIL – ANNÉE 2004

MOTS CLEFS : RAYONNEMENT IONISANT – RADIODERMITE –
RADIOPROTECTION – TUMEUR RADIO-INDUITE.

INTITULÉ ET ADRESSE DE L'U.F.R. :

Faculté de Médecine de Nancy
9, avenue de la Forêt de Haye
54505 VANDOEUVRE LÈS NANCY CEDEX
