



HAL
open science

Niveau de sensibilisation des médecins généralistes de Moselle face au risque radiologique : étude observationnelle et descriptive

Sterenn Gautier

► To cite this version:

Sterenn Gautier. Niveau de sensibilisation des médecins généralistes de Moselle face au risque radiologique : étude observationnelle et descriptive. Médecine humaine et pathologie. 2023. hal-04517140

HAL Id: hal-04517140

<https://hal.univ-lorraine.fr/hal-04517140>

Submitted on 22 Mar 2024

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.



**UNIVERSITÉ
DE LORRAINE**

**BIBLIOTHÈQUES
UNIVERSITAIRES**

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 bibliothèque : ddoc-thesesexercice-contact@univ-lorraine.fr
(Cette adresse ne permet pas de contacter les auteurs)

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>

THESE
Pour obtenir le grade de
DOCTEUR EN MEDECINE GENERALE

Présentée et soutenue publiquement
Dans le cadre du troisième cycle de Médecine Générale

Par

Interne des Hôpitaux des Armées GAUTIER Sterenn

Élève de l'École du Val-de-Grâce – Paris

Ancienne élève de l'École du Service de santé des armées de Lyon

Le 16 Mai 2023

« Niveau de sensibilisation des médecins généralistes de Moselle face au risque radiologique: étude observationnelle et descriptive. »

Examineurs de la thèse et Jury :

| | |
|-------------------------------------|--------------------|
| M. le Professeur DI PATRIZIO Paolo, | Président |
| Mme. la Professeure SIEGRIST Sophie | Juge |
| M. le Docteur CANTON Antoine | Juge |
| M. le Médecin en Chef NAULET Pierre | Juge |
| M. le Docteur WAGENHEIM Cédric | Directeur de Thèse |

Présidente de l'Université de Lorraine :
Madame Hélène BOULANGER

Doyen de la Faculté de Médecine
Professeur Marc BRAUN

Vice-doyenne
Pr Louise TYVAERT

Assesseurs :

- *Premier cycle* : Pr Thomas SCHWITZER et Dr Nicolas GAMBIER
- *Deuxième cycle* : Pr Antoine KIMMOUN
- *Troisième cycle hors MG* : Pr Marie-Reine LOSSER
- *Troisième cycle MG* : Pr Paolo DI PATRIZIO
- *Finances* : Prs Eliane ALBUISSON et Louise TYVAERT
- *Vie hospitalo-universitaire* : Pr Stéphane ZUILY
- *Relations avec la Grande Région* : Pr Thomas FUCHS-BUDER
- *Relations Internationales* : Pr Jacques HUBERT
- *Valorisation* : Pr Pascal ESCHWEGE
- *Interface avec les métiers de la santé* : Pr Céline HUSELSTEIN
- *Docimologie* : Pr Jacques JONAS
- *ECOS* : Pr Patrice GALLET, Dr Eva FEIGERLOVA
- *Service sanitaire* : Pr Nelly AGRINIER
- *Lecture critique d'articles* : Drs Jonathan EPSTEIN et Aurélie BANNAY
- *Interface HVL & Réseau Nasce* : Prs Nicla SETTEMBRE, Fabienne ROUYER-LIGIER et Pablo MAUREIRA
- *Etudiant* : Mehdi BELKHITER

Chargé de mission

- *PASS Médecine* : Dr Nicolas GAMBIER

Présidente du Conseil Pédagogique : Pr Louise TYVAERT
Président du Conseil Scientifique : Pr Abderrahim OUSSALAH

=====
DOYENS HONORAIRES

Professeur Jacques ROLAND - Professeur Patrick NETTER - Professeur Henry COUDANE

=====
PROFESSEURS HONORAIRES

Etienne ALIOT - Jean-Marie ANDRE - Alain AUBREGÉ - Gérard BARROCHE - Alain BERTRAND - Pierre BEY - Marc-André BIGARD Patrick BOISSEL – Pierre BORDIGONI - Jacques BORRELLY - Michel BOULANGE - Jean-Louis BOUTROY - Serge BRACARD
Laurent BRESLER - Serge BRIANÇON - Jean-Claude BURDIN - Claude BURLET - Daniel BURNEL - François CHERRIER
Henry COUDANE - Jean-Pierre CRANCE - Gilles DAUTEL - Jean-Pierre DESCHAMPS - Gilbert FAURE - Gérard FIEVE
Bernard FOLIGUET - Jean FLOQUET - Robert FRISCH - Pierre GAUCHER - Jean-Luc GEORGE - Alain GERARD - Hubert GERARD Jean-Marie GILGENKRANTZ - Simone GILGENKRANTZ - Gilles GROSDIDIER - Philippe HARTEMANN - Dominique HESTIN
Bruno HOEN - Gérard HUBERT - Claude HURIET – Jean-Pierre KAHN - Gilles KARCHER - Michèle KESSLER - François KOHLER Pierre LANDES - Pierre LASCOMBES - Marie-Claire LAXENAIRE - Michel LAXENAIRE - Alain LE FAOU - Jacques LECLERE
Pierre LEDERLIN - Bernard LEGRAS - Bruno LEHEUP - Jean-Pierre MALLIÉ - Philippe MANGIN - François MARCHAL

Jean-Claude MARCHAL - Yves MARTINET - Pierre MATHIEU - Thierry MAY - Michel MERLE - Daniel MOLÉ - Pierre MONIN
Pierre NABET - Patrick NETTER - Jean-Pierre NICOLAS - Francis PENIN - Claude PERRIN - François PLENAT - Jacques
POUREL Francis RAPHAEL - Antoine RASPILLER - Denis REGENT - Jacques ROLAND - Daniel SCHMITT - Michel SCHMITT
Jean-Luc SCHMUTZ - Michel SCHWEITZER - Daniel SIBERTIN-BLANC - Claude SIMON - Jean-François STOLTZ
Michel STRICKER - Gilbert THIBAUT - Paul VERT - Hervé VESPIGNANI - Colette VIDAILHET - Michel VIDAILHET
Jean-Pierre VILLEMOT - Denis ZMIROU - Faïez ZANNAD

=====

PROFESSEURS ÉMÉRITES

Serge BRACARD - Laurent BRESLER - Serge BRIANÇON - Henry COUDANE - Jean-Pierre CRANCE - Gilbert FAURE -
Bruno HOEN - Jean-Pierre KAHN - Gilles KARCHER - Michèle KESSLER - Alain LE FAOU - Bruno LEHEUP - Thierry MAY -
Patrick NETTER - Jean-Pierre NICOLAS - Michel SCHMITT - Jean-Luc SCHMUTZ - Faïez ZANNAD

=====

PROFESSEURS DES UNIVERSITÉS - PRATICIENS HOSPITALIERS

(Disciplines du Conseil National des Universités)

42^e Section : MORPHOLOGIE ET MORPHOGENÈSE

1^{re} sous-section : Anatomie

Professeur Marc BRAUN - Professeure Manuela PEREZ

2^e sous-section : Histologie, embryologie et cytogénétique

Professeur Christo CHRISTOV

3^e sous-section : Anatomie et cytologie pathologiques

Professeur Guillaume GAUCHOTTE – Professeur Hervé SARTELET

43e Section : BIOPHYSIQUE ET IMAGERIE MÉDICALE

1^{re} sous-section : Biophysique et médecine nucléaire

Professeur Pierre-Yves MARIE – Professeur Pierre OLIVIER - Professeur Antoine VERGER

2^e sous-section : Radiologie et imagerie médicale

Professeur René ANXIONNAT - Professeur Alain BLUM - Professeure Valérie CROISÉ - Professeur Jacques FELBLINGER
- Professeur Benjamin GORY - Professeur Damien MANDRY - Professeur Pedro GONDIM TEIXEIRA

44^e Section : BIOCHIMIE, BIOLOGIE CELLULAIRE ET MOLÉCULAIRE, PHYSIOLOGIE ET NUTRITION

1^{re} sous-section : Biochimie et biologie moléculaire

Professeur Jean-Louis GUEANT - Professeur David MEYRE - Professeur Bernard NAMOUR - Professeur Jean-Luc
OLIVIER - Professeur Abderrahim OUSSALAH

2^e sous-section : Physiologie

Professeur Christian BEYAERT - Professeur Bruno CHENUÉL - Professeur Mathias POUSSEL - Professeur Jacques
JONAS

3^e sous-section : Biologie cellulaire

Professeure Véronique DECOT-MAILLERET

4^e sous-section : Nutrition

Professeur Didier QUILLIOT - Professeure Rosa-Maria RODRIGUEZ-GUEANT - Professeur Olivier ZIEGLER

45^e Section : MICROBIOLOGIE, MALADIES TRANSMISSIBLES ET HYGIÈNE

1^{re} sous-section : Bactériologie – virologie ; hygiène hospitalière

Professeur Alain LOZNIIEWSKI – Professeure Evelyne SCHVOERER

2^e sous-section : Parasitologie et Mycologie

Professeure Marie MACHOUART

3^e sous-section : Maladies infectieuses ; maladies tropicales

Professeure Céline PULCINI - Professeur Christian RABAUD

46^e Section : SANTÉ PUBLIQUE, ENVIRONNEMENT ET SOCIÉTÉ

1^{re} sous-section : Épidémiologie, économie de la santé et prévention

Professeure Nelly AGRINIER - Professeur Francis GUILLEMIN - Professeur Cédric BAUMANN

4^e sous-section : Biostatistiques, informatique médicale et technologies de communication

Professeure Eliane ALBUISSON - Professeur Nicolas JAY

47^e Section : CANCÉROLOGIE, GÉNÉTIQUE, HÉMATOLOGIE, IMMUNOLOGIE

1^{re} sous-section : Hématologie ; transfusion

Professeur Pierre FEUGIER – Professeur Thomas LECOMPTE - Professeur Julien BROSEUS

2^e sous-section : *Cancérologie ; radiothérapie*

Professeur Thierry CONROY - Professeur Frédéric MARCHAL - Professeur Didier PEIFFERT

3^e sous-section : *Immunologie*

Professeur Marcelo DE CARVALHO-BITTENCOURT - Professeure Marie-Thérèse RUBIO

4^e sous-section : *Génétique*

Professeur Philippe JONVEAUX

48^e Section : ANESTHÉSIOLOGIE, RÉANIMATION, MÉDECINE D'URGENCE, PHARMACOLOGIE ET THÉRAPEUTIQUE

1^{re} sous-section : *Anesthésiologie-réanimation et médecine péri-opératoire*

Professeur Gérard AUDIBERT - Professeur Hervé BOUAZIZ - Professeur Thomas FUCHS-BUDER
Professeure Marie-Reine LOSSER - Professeur Claude MEISTELMAN - Professeur Philippe GUERCI

2^e sous-section : *Médecine intensive-réanimation*

Professeur Sébastien GIBOT - Professeur Bruno LÉVY - Professeur Antoine KIMMOUN

3^e sous-section : *Pharmacologie fondamentale ; pharmacologie clinique ; addictologie*

Professeur Pierre GILLET - Professeur Jean-Yves JOUZEAU

4^e sous-section : *Thérapeutique-médecine de la douleur ; addictologie*

Professeur Nicolas GIRERD

5^e sous-section : *Médecine d'urgence*

Professeur Tahar CHOUIHED

49^e Section : PATHOLOGIE NERVEUSE ET MUSCULAIRE, PATHOLOGIE MENTALE, HANDICAP ET RÉÉDUCATION

1^{re} sous-section : *Neurologie*

Professeur Marc DEBOUVERIE - Professeur Louis MAILLARD - Professeur Sébastien RICHARD - Professeur Luc TAILLANDIER
Professeure Louise TYVAERT

2^e sous-section : *Neurochirurgie*

Professeur Thierry CIVIT - Professeure Sophie COLNAT-COULBOIS - Professeur Olivier KLEIN

3^e sous-section : *(Psychiatrie d'adultes ; addictologie*

Professeur Vincent LAPREVOTE - Professeur Raymund SCHWAN - Professeur Thomas SCHWITZER -
Professeure Fabienne ROUYER-LIGIER

4^e sous-section : *Pédopsychiatrie ; addictologie*

Professeur Bernard KABUTH

5^e sous-section : *Médecine physique et de réadaptation*

Professeur Jean PAYSANT

50^e Section : PATHOLOGIE OSTÉO-ARTICULAIRE, DERMATOLOGIE ET CHIRURGIE PLASTIQUE

1^{re} sous-section : *Rhumatologie*

Professeure Isabelle CHARY-VALCKENAERE - Professeur Damien LOEUILLE

2^e sous-section : *Chirurgie orthopédique et traumatologique*

Professeur Laurent GALOIS - Professeur Didier MAINARD - Professeur François SIRVEAUX

3^e sous-section : *Dermato-vénéréologie*

Professeure Anne-Claire BURSZTEJN

4^e sous-section : *Chirurgie plastique, reconstructrice et esthétique ; brûlologie*

Professeur François DAP - Professeur Etienne SIMON

51^e Section : PATHOLOGIE CARDIO-RESPIRATOIRE ET VASCULAIRE

1^{re} sous-section : *Pneumologie ; addictologie*

Professeur Jean-François CHABOT - Professeur Ari CHAOUAT

2^e sous-section : *Cardiologie*

Professeur Edoardo CAMENZIND - Professeur Christian de CHILLOU DE CHURET – Professeur Olivier HUTTIN
Professeur Batric POPOVIC - Professeur Nicolas SADOUL

3^e sous-section : *Chirurgie thoracique et cardiovasculaire*

Professeur Juan-Pablo MAUREIRA - Professeur Stéphane RENAUD

4^e sous-section : *Chirurgie vasculaire ; médecine vasculaire*

Professeur Sergueï MALIKOV - Professeur Denis WAHL – Professeur Stéphane ZUILY - Professeure Nicla SETTEMBRE

52^e Section : MALADIES DES APPAREILS DIGESTIF ET URINAIRE

1^{re} sous-section : *Gastroentérologie ; hépatologie ; addictologie*

Professeur Jean-Pierre BRONOWICKI - Professeur Laurent PEYRIN-BIROULET

2^e sous-section : Chirurgie viscérale et digestive

Professeur Ahmet AYAV - Professeur Laurent BRUNAUD – Professeure Adeline GERMAIN

3^e sous-section : Néphrologie

Professeur Luc FRIMAT

4^e sous-section : Urologie

Professeur Pascal ESCHWEGE - Professeur Jacques HUBERT

53^e Section : MÉDECINE INTERNE, GÉRIATRIE ET MÉDECINE GÉNÉRALE

1^{re} sous-section : Médecine interne ; gériatrie et biologie du vieillissement ; addictologie

Professeur Athanase BENETOS - Professeur Jean-Dominique DE KORWIN - Professeure Gisèle KANNY
Professeure Christine PERRET-GUILLAUME – Professeur Roland JAUSSAUD – Professeure Laure JOLY

3^e sous-section : Médecine générale

Professeur Jean-Marc BOIVIN - Professeur Paolo DI PATRIZIO

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

1^{re} sous-section : Pédiatrie

Professeur Pascal CHASTAGNER - Professeur François FEILLET - Professeur Jean-Michel HASCOET -
Professeur Cyril SCHWEITZER

2^e sous-section : Chirurgie infantile

Professeur Pierre JOURNEAU - Professeur Jean-Louis LEMELLE

3^e sous-section : Gynécologie-obstétrique ; gynécologie médicale

Professeur Philippe JUJLIN - Professeur Olivier MOREL

4^e sous-section : Endocrinologie, diabète et maladies métaboliques ; gynécologie médicale

Professeur Bruno GUERCI - Professeur Marc KLEIN - Professeur Georges WERYHA

55^e Section : PATHOLOGIE DE LA TÊTE ET DU COU

1^{re} sous-section : Oto-rhino-laryngologie

Professeur Roger JANKOWSKI - Professeure Cécile PARIETTI-WINKLER - Professeure Cécile RUMEAU -
Professeur Patrice GALLET

2^e sous-section : Ophtalmologie

Professeure Karine ANGIOI - Professeur Jean-Paul BERROD – Professeur Jean-Baptiste CONART

3^e sous-section : Chirurgie maxillo-faciale et stomatologie

Professeure Muriel BRIX

=====

PROFESSEURS DES UNIVERSITÉS

61^e Section : GÉNIE INFORMATIQUE, AUTOMATIQUE ET TRAITEMENT DU SIGNAL

Professeur Walter BLONDEL

64^e Section : BIOCHIMIE ET BIOLOGIE MOLÉCULAIRE

Professeure Sandrine BOSCHI-MULLER - Professeur Pascal REBOUL

65^e Section : BIOLOGIE CELLULAIRE

Professeure Céline HUSELSTEIN

66^e Section : PHYSIOLOGIE

Professeur Nguyen TRAN

=====

PROFESSEUR ASSOCIÉ DE MÉDECINE GÉNÉRALE

53^e Section, 3^e sous-section : Médecine générale

Professeure associée Sophie SIEGRIST - Professeur associé Olivier BOUCHY

=====

MAÎTRES DE CONFÉRENCES DES UNIVERSITÉS - PRATICIENS HOSPITALIERS

42^e Section : MORPHOLOGIE ET MORPHOGENÈSE

1^{re} sous-section : Anatomie

Docteur Bruno GRIGNON

44^e Section : BIOCHIMIE, BIOLOGIE CELLULAIRE ET MOLÉCULAIRE, PHYSIOLOGIE ET NUTRITION

1^{re} sous-section : Biochimie et biologie moléculaire

Docteure Shyue-Fang BATTAGLIA - Docteure Sophie FREMONT - Docteure Isabelle GASTIN –
Docteure Catherine MALAPLATE - Docteur Marc MERTEN

2^e sous-section : *Physiologie*

Docteure Iulia-Cristina IOAN

45^e Section : MICROBIOLOGIE, MALADIES TRANSMISSIBLES ET HYGIÈNE

1^{re} sous-section : *Bactériologie – Virologie ; hygiène hospitalière*

Docteure Corentine ALAUZET - Docteure Hélène JEULIN - Docteure Véronique VENARD

2^e sous-section : *Parasitologie et mycologie*

Docteure Anne DEBOURGOGNE

46^e Section : SANTÉ PUBLIQUE, ENVIRONNEMENT ET SOCIÉTÉ

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

Docteure Frédérique CLAUDOT - Docteur Arnaud FLORENTIN - Docteur Jonathan EPSTEIN – Docteur Abdou OMOROU

2^e sous-section *Médecine et Santé au Travail*

Docteure Isabelle THAON

4^e sous-section : *Biostatistiques, informatique médicale et technologies de communication*

Docteure Aurélie BANNAY (stagiaire)

47^e Section : CANCÉROLOGIE, GÉNÉTIQUE, HÉMATOLOGIE, IMMUNOLOGIE

1^{re} sous-section : *Hématologie ; transfusion*

Docteure Maud D'AVENI

2^e sous-section : *Cancérologie ; radiothérapie*

Docteure Lina BOLOTINE

3^e sous-section : *Immunologie*

Docteure Alice AARNINK

4^e sous-section : *Génétique*

Docteure Céline BONNET - Docteure Mathilde RENAUD

48^e Section : ANESTHÉSIOLOGIE, RÉANIMATION, MÉDECINE D'URGENCE, PHARMACOLOGIE ET THÉRAPEUTIQUE

3^e sous-section : *Pharmacologie fondamentale ; pharmacologie clinique ; addictologie*

Docteur Nicolas GAMBIER - Docteur Julien SCALA-BERTOLA -

Docteure Élise PAPE (stagiaire)

49^e Section : PATHOLOGIE NERVEUSE ET MUSCULAIRE, PATHOLOGIE MENTALE, HANDICAP ET RÉÉDUCATION

2^e sous-section : *Neurochirurgie*

Docteur Fabien RECH

50^e Section : PATHOLOGIE OSTÉO-ARTICULAIRE, DERMATOLOGIE ET CHIRURGIE PLASTIQUE

4^e sous-section : *Chirurgie plastique, reconstructrice et esthétique ; brûlologie*

Docteure Laetitia GOFFINET-PLEUTRET

51^e Section : PATHOLOGIE CARDIO-RESPIRATOIRE ET VASCULAIRE

3^e sous-section : *Chirurgie thoracique et cardio-vasculaire*

Docteur Fabrice VANHUYSSE

54^e Section : DEVELOPPEMENT ET PATHOLOGIE DE L'ENFANT, GYNECOLOGIE-OBSTETRIQUE, ENDOCRINOLOGIE ET REPRODUCTION

1^e sous-section : *Pédiatrie*

Docteure Cécile POCHON – Docteur Amandine DIVARET-CHAUVEAU

3^e sous-section : *Gynécologie-obstétrique ; gynécologie médicale*

Docteur Charline BERTHOLD

4^e sous-section : *Endocrinologie, diabète et maladies métaboliques ; Gynécologie médicale*

Docteure Eva FEIGERLOVA

5^e sous-section : *Biologie et médecine du développement et de la reproduction ; gynécologie médicale*

Docteur Mikaël AGOPIANTZ

=====

MAÎTRES DE CONFÉRENCES

5^e Section : SCIENCES ÉCONOMIQUES

Monsieur Vincent LHUILLIER

63^e Section : GÉNIE ÉLECTRIQUE, ÉLECTRONIQUE, PHOTONIQUE ET SYSTÈMES

Madame Pauline SOULET LEFEBVRE

64^e Section : BIOCHIMIE ET BIOLOGIE MOLÉCULAIRE

Madame Marie-Claire LANHERS - Monsieur Nick RAMALANJAONA

65^e Section : BIOLOGIE CELLULAIRE

Madame Nathalie AUCHET – Madame Rûmeyza BASCETIN - Madame Natalia DE ISLA-MARTINEZ –
Monsieur Christophe NEMOS – Monsieur Simon TOUPANCE

69^e Section : NEUROSCIENCES

Madame Sylvie MULTON

90^e Section : MAÏEUTIQUE

Madame Gaëlle AMBROISE (stagiaire)

=====

MAÎTRES DE CONFÉRENCES ASSOCIÉS DE MÉDECINE GÉNÉRALE

53^e Section, 3^e sous-section : (*Médecine générale*)

Docteur Antoine CANTON - Docteur Jean-Charles VAUTHIER

=====

DOCTEURS HONORIS CAUSA

Professeur Pierre-Marie GALETTI (1982)
Brown University, Providence (U.S.A)
Professeure Mildred T. STAHLMAN (1982)
Vanderbilt University, Nashville (U.S.A)
Professeur Théodore H. SCHIEBLER (1989)
Institut d'Anatomie de Würzburg (R.F.A)
Professeur Mashaki KASHIWARA (1996)
*Research Institute for Mathematical Sciences de
Kyoto (JAPON)*

Professeur Ralph GRÄSBECK (1996)
Université d'Helsinki (FINLANDE)
Professeur Duong Quang TRUNG (1997)
Université d'Hô Chi Minh-Ville (VIËTNAM)
Professeur Daniel G. BICHET (2001)
Université de Montréal (Canada)
Professeur Marc LEVENSTON (2005)
Institute of Technology, Atlanta (USA)

Professeur Brian BURCHELL (2007)
Université de Dundee (Royaume-Uni)
Professeur Yunfeng ZHOU (2009)
Université de Wuhan (CHINE)
Professeur David ALPERS (2011)
Université de Washington (U.S.A)
Professeur Martin EXNER (2012)
Université de Bonn (ALLEMAGNE)

Remerciements

A Monsieur le Professeur DI PATRIZIO Paolo, Professeur des Universités de Médecine Générale

Assesseur du 3ème cycle de médecine générale Directeur du Département de Médecine Générale

Directeur du DEpartement Grand Est de Recherche en Soins Primaires (DEGERESP)

Membre du conseil scientifique de la faculté de médecine, de maïeutique et des métiers de la santé

Membre du conseil de la pédagogie de la faculté de médecine, de maïeutique et des métiers de la santé

Coordonnateur local de Nancy et régional Grand Est du DES de MG

Consultant-Expert du dispositif d'aide à l'installation de Nancy auprès de l'ARS Grand Est (GEMINSTAL)

Coordonnateur du DIU de remise à niveau en vue de l'exercice de la médecine générale

EA 4432 Laboratoire Interpsy-Axe Prisme, Membre (Collège A) du conseil d'unité

Je vous remercie de l'honneur que vous me faites en présidant ce jury de thèse ainsi qu'à l'intérêt que vous portez au fruit de ce travail. Veuillez recevoir l'expression de mon immense gratitude.

Remerciements

A Madame la Professeure SIGRIEST Sophie,

Professeure Associée de Médecine Générale au sein du DUMG de la Faculté de Médecine de Nancy

Je vous remercie de l'honneur que vous me faites en jugeant le fruit de ce travail. Veuillez recevoir l'expression de mon immense gratitude.

A Monsieur le Docteur CANTON Antoine,

Maître de Conférences Associé de Médecine Générale

Je vous remercie de l'honneur que vous me faites en jugeant le fruit de ce travail. C'était également un privilège de vous rencontrer dans le cadre des Groupes d'Echanges de Pratiques. Veuillez recevoir l'expression de mon immense gratitude.

A Monsieur le Médecin en Chef NAULET Pierre,

Praticien des Armées

Chef de service de Radiologie de l'HIA Legouest,

Je vous remercie de l'honneur que vous me faites en jugeant le fruit de ce travail et pour votre accompagnement au fil de ma formation. C'est toujours un plaisir de travailler avec vous et souvent une occasion d'approfondir mes connaissances médicales. Merci encore pour votre relecture et vos conseils. Veuillez recevoir l'expression de mon immense gratitude.

A Monsieur le Docteur WAGENHEIM Cédric,

Médecin Hors Classe

Chef de département de l'organisation du secours médical au Service d'Incendie et de Secours de la Moselle

Médecin expert sanitaire et planification SSE à l'ARS Grand'Est

Formateur DPC NRBC-E à l'HIA Legouest

Merci infiniment de m'avoir accompagnée dans ce travail de thèse qui était une première pour tous les deux. Merci également d'avoir su trouver la juste distance tout au long de ce travail et selon les différents évènements qui ont jalonné ces trois années. Merci enfin pour tout ton travail de relecture, de correction et de répétiteur. J'espère que d'autres après moi auront la chance de t'avoir pour directeur de thèse.



**MINISTÈRE
DES ARMÉES**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



ÉCOLE DU VAL DE GRACE – Paris

A Monsieur le médecin général inspecteur Guillaume PELÉE de SAINT MAURICE

Directeur de l'École du Val-de-Grâce

Professeur agrégé de l'Ecole du Val-de-Grâce

Chevalier de la Légion d'Honneur

Chevalier dans l'Ordre National du Mérite

Chevalier dans l'Ordre des Palmes Académiques

A Monsieur le médecin en chef ^(TA) Pierre-Eric SCHWARTZBROD

Directeur-adjoint de l'École du Val-de-Grâce

Professeur agrégé de l'Ecole du Val-de-Grâce

Chevalier de la Légion d'Honneur

Chevalier dans l'Ordre National du Mérite

Remerciements

Merci à vous...

Papa et Maman,

Pour m'avoir encouragée, soutenue, poussée pendant toutes ces années d'études qui ont été très longues. Pour l'implication dont vous avez toujours fait preuve concernant ma scolarité, que ce soit à Ploudaniel, Landerneau, Brest, Lyon ou Metz. Pour avoir fait de moi la personne que je suis aujourd'hui et dont j'espère que vous êtes fières. Avec l'achèvement de ce travail je deviens enfin Dr.GAUTIER, on va dire que c'est pas mal !

Katell et Riwan,

Pour votre présence, même à distance. Pour votre sollicitude, même quand vous ne comprenez pas ce que je fais. Pour toutes vos petites attentions qui ont jalonné mon parcours, surtout quand elles me font grand plaisir. C'est sûrement un peu grâce à vous que j'aime m'occuper des autres. J'adore vous retrouver, peu importe l'occasion et j'espère que cette thèse sera aussi un motif pour se réunir autour d'une soirée crêpes.

Mes grands-parents,

Mamie Annick, Mamie Eliane, Papi Denis et Papi Robert. Que vous soyez là pour le voir ou non, je vous remercie de m'avoir encouragé pendant toutes ces années qui m'ont menées jusqu'au doctorat. Bien travailler c'est aussi prendre des vacances et celles que j'ai passées avec vous sont des souvenirs que je garderai précieusement toute ma vie. Vous m'avez transmis l'amour de l'école et le goût du travail, merci beaucoup pour cela.

Véro,

Je pense bien fort à toi à l'occasion de la fin de ce travail qui marque une nouvelle étape dans ma vie. J'aurais voulu que tu sois là pour partager avec moi ce moment de joie et faire un jeu de mot dont tu avais le secret. Merci d'avoir été là, même si ce n'est plus que dans nos mémoires et nos cœurs.

Ma famille,

Certains diront peut-être que « Ya pas nécessaire » ; mais que vous soyez issus de la branche GAUTIER, JERON, LE BAIL, BOURLES ou pièces rapportées, je vous remercie tous pour les nombreux bons moments que nous avons passés ensemble. J'espère que l'avenir nous en réserve encore de très nombreux. J'ai adoré grandir à vos côtés, merci pour tout ce que vous m'avez apporté.

Merci également...

Emilie (cothe), Manon et Mylène,

Pour tout ce que nous avons partagé ensemble : les réussites, les déceptions, les fous rires, les crises de larmes, les aventures en France et à l'étranger et toutes les journées mornes de l'externat. Merci d'avoir été et d'être toujours des amies fabuleuses.

Le temps des copains,

Anaïs, Briec, Etienne, Emilie, Louis, Pilou, Salya, Tess, Victor, Victorine. Sans vous la vie à la Boate n'aurait pas été pareille, et ma vie tout court non plus. J'espère que nos chemins continueront à se croiser régulièrement au fil des vacances, des événements de vie, des formations et peut-être des affectations et des missions.

Lisa, Nathan et tous les anciens de la famille,

Merci d'avoir été si présents et si impliqués pour me maintenir en vie pendant ces années de P1 qui ont été difficiles. Merci aussi d'avoir été encore là pour me guider, me conseiller, me faire rire et passer de chouettes moments lorsque les années ont continué de défiler. Je vous souhaite le meilleur au bloc opératoire et surtout dans vos vies personnelles.

Jules, Julianna, Yaël, Pierre-Yves et tous les bizuths de la famille,

A vous les poussins avec qui j'ai adoré faire des repas familles ou tout autre événement impliquant de se réunir autour de trucs à manger. Que je vous ai choisi ou non, vous êtes tous de très belles rencontres et j'espère vous recroiser plus tard au gré de nos déplacements, essayez juste de ne pas m'appeler « maman » en unité, ce serait plus crédible ;-)

La team messine,

Aurore, Gurvan, Louis, Adeline, Mathilde, Martin, Caroline, Guillaume... Spéciale dédicace à Sébastien, mon co-interne

Pour continuer d'égayer cet internat à grand renfort de repas, apéros, sorties, balades et autres divertissements. C'est super chouette de pouvoir compter sur vous dans les moments sympas comme dans les coups de mou. Courage Séb, bientôt on en aura fini de l'hôpital et notre vrai métier commencera !

Major MASSON,

Pour votre aide précieuse concernant le travail de statistique que je n'aurai pu faire sans vous. Merci d'avoir été si disponible, si rapide et surtout si gentille.

Et enfin merci...

Pierre,

Pour m'avoir supportée pendant ce travail de thèse parfois source de tensions et d'anxiété pour moi, pour m'avoir conseillée, relue et soutenue. Et surtout merci d'être toi, merci d'être là. Merci de t'être mis sur mon chemin et de m'avoir permis d'être vraiment heureuse et épanouie. Merci pour tous les beaux souvenirs que nous avons ensemble, pour les rires et les sourires qui remplissent notre maison. Merci d'être le compagnon attentif et le papa impliqué que tu es. J'espère me réveiller à tes côtés pendant encore plus de jours que je ne peux en compter. Je t'aime mon chéri.

Héloïse,

Ce projet de thèse est pour le moment plus vieux que toi ma choupette. Peut-être qu'un jour tu tomberas sur un exemplaire de ce travail, rangé sur une étagère ou dans un placard, et que tu liras ces mots qui sont spécialement pour toi. Merci d'avoir été si facile et d'être un si grand bonheur dans ma vie, cela m'aura permis de travailler sereinement et de terminer enfin ce travail. J'espère pouvoir passer avec toi le temps qui sera ainsi libéré, te voir continuer de grandir, continuer d'apprendre et surtout j'espère que tu garderas ton beau sourire au fil des années. Je t'aime mon bébé.

« Allez où la Patrie et l'Humanité vous appellent. Soyez y toujours prêts à servir l'une et l'autre et s'il le faut sachez imiter ceux de vos généreux compagnons qui, au même poste, sont morts martyrs de ce dévouement intrépide et magnanime qui est le véritable acte de Foi des hommes notre Etat. »

Baron PERCY

Chirurgien en Chef de la Grande Armée

Aux chirurgiens sous-aides, 1811

« 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 Matière

| | |
|--|----|
| Table des Matière | 15 |
| Tableaux et figures | 19 |
| Liste des abréviations | 20 |
| Introduction | 22 |
| Généralités | 24 |
| A. Rappels historiques | 24 |
| 1. La découverte de l'atome | 24 |
| a. De la Grèce à la fin du XVIIIème siècle : la théorie de l'atome | 24 |
| b. Le XIXème siècle et le modèle atomique | 24 |
| c. De Rutherford à nos jours : vers la physique nucléaire contemporaine | 25 |
| 2. Naissance de l'imagerie médicale | 26 |
| 3. Fission nucléaire et exploitation industrielle | 27 |
| 4. Les accidents nucléaires et radiologiques à travers l'Histoire | 28 |
| a. Accidents à caractère militaire : l'exemple de Palomares 1966 [12] | 29 |
| b. Accidents de réacteur : l'exemple de Tchernobyl 1986 | 29 |
| c. Sources radioactives à usage industriel : l'exemple de Forbach 1991 | 31 |
| d. Accidents de criticité : l'exemple de Tokaï Mura 1999 | 32 |
| e. Sources radioactives à usage médical : l'exemple de Goiana en 1987 et d'Epinal en 2004 | 33 |
| B. Notions fondamentales [25] | 34 |
| 1. Définition de l'atome et grandeurs | 34 |
| a. Constitution (numéro atomique) | 34 |
| b. Période | 35 |
| c. Activité | 35 |
| d. Notion de dose (absorbée, équivalente et efficace) | 36 |
| 2. Types de rayonnements | 36 |
| a. Chargés lourds | 36 |
| b. Chargés légers | 37 |
| c. Non chargés | 37 |
| 3. Interaction des rayonnements avec la matière | 38 |
| a. Effet photoélectrique | 38 |

| | | |
|----|---|----|
| b. | Effet Compton..... | 38 |
| c. | Création de paires..... | 39 |
| C. | Effets sur l'organisme | 39 |
| 1. | Contamination interne, contamination externe et irradiation | 39 |
| 2. | Effet stochastique..... | 40 |
| 3. | Effet déterministe | 41 |
| a. | Syndrome d'irradiation aigue localisée..... | 41 |
| c. | Effets à long terme..... | 43 |
| D. | Les rayonnements au quotidien..... | 44 |
| 1. | Irradiation naturelle..... | 44 |
| 2. | Irradiation artificielle..... | 45 |
| E. | Radioprotection | 46 |
| 1. | Sociétés savantes : ICRU, UNSCEAR, CIPR, AIEA, AEN, IRPA, G7 et Mexico, CE, HERCA, ALARA, ISN, ASN | 46 |
| 2. | Directive EURATOM 2013/59 en application de la CIPR 103 par décret du 4 juin 2018..... | 50 |
| F. | Radiocontaminants majeurs | 53 |
| 1. | ^{241}Am / ^{137}Cs / ^{60}Co / ^{131}I / ^{239}Pu / ^3H / ^{235}U et ^{238}U | 53 |
| 2. | Traitements des radiocontaminants | 54 |
| G. | Scénarii des expositions accidentelles en médecine générale..... | 56 |
| 1. | Incident de centrale nucléaire productrice d'énergie (CNPE) | 56 |
| 2. | Exposition médicale..... | 57 |
| 3. | Terrorisme | 58 |
| a. | Attaque d'installation nucléaire civile à évènement initiateur insidieux | 58 |
| b. | Contamination de denrées alimentaires ou de réseau de distribution d'eau..... | 58 |
| c. | Epandage de produit radiologique | 58 |
| d. | Source scellée | 59 |
| H. | Spécificités de la Moselle | 59 |
| 1. | Exposition naturelle..... | 59 |
| 2. | Exposition artificielle..... | 60 |
| | Matériels et Méthodes..... | 62 |

| | |
|--|----|
| A. Etude | 62 |
| B. Questionnaire..... | 62 |
| 1. Elaboration du questionnaire | 62 |
| 2. Diffusion du questionnaire..... | 62 |
| C. Population | 63 |
| D. Analyse statistique | 63 |
| Résultats..... | 64 |
| A. Données épidémiologiques | 64 |
| 1. Sexe..... | 64 |
| 2. Fin de l'internat | 64 |
| 3. Mode d'exercice | 64 |
| 4. Exercice seul ou à plusieurs | 65 |
| 5. Distance du lieu d'exercice principal avec la centrale nucléaire de Cattenom..... | 65 |
| B. Exposition au travail | 65 |
| 1. Prise en compte du risque radiologique..... | 65 |
| 2. Résultats de surveillance d'exposition radiologique | 66 |
| 3. Examens complémentaires..... | 66 |
| 4. Diagnostic évoqué | 68 |
| C. Examens d'imagerie | 68 |
| 1. Modification de prescription de scanner..... | 68 |
| 2. Alternative choisie | 69 |
| 3. Interrogation sur la dose de rayonnement ionisant reçue par un patient lors d'un examen d'imagerie | 69 |
| 4. Equivalent dose journalière d'exposition d'un scanner abdominopelvien | 69 |
| D. Situations d'urgence..... | 70 |
| 1. Evoquer un Syndrome Aigu d'Irradiation en phase initiale | 70 |
| 2. Capacité à conseiller sur la prise de comprimés d'iode | 70 |
| 3. Vers qui se tourner en cas de suspicion d'exposition radiologique | 70 |
| 4. Recevoir des messages d'alerte de la CNPE Cattenom | 71 |

| | |
|--|----|
| E. Pistes d'amélioration | 71 |
| 1. Souhait d'être informé sur le risque radiologique | 71 |
| 2. Média d'information souhaité | 71 |
| F. Objectif secondaire | 72 |
| 1. Données épidémiologiques | 72 |
| 2. Exposition au travail | 73 |
| 3. Examens d'imagerie | 75 |
| 4. Situations d'urgence | 77 |
| Discussion | 79 |
| A. Forces et limites | 79 |
| 1. Forces de l'étude | 79 |
| 2. Limites de l'étude | 79 |
| 3. Profil des participants | 80 |
| B. Analyse des réponses | 81 |
| 1. Prise en compte du risque au travail | 81 |
| 2. Risque lié à l'imagerie médicale | 81 |
| 3. Aisance en situation d'urgence | 82 |
| 4. Propositions d'approfondissement | 83 |
| 5. Lien entre niveau de sensibilisation et distance à la centrale nucléaire | 83 |
| Conclusion | 84 |
| Bibliographie | 86 |
| Annexe | 93 |
| A. Questionnaire | 93 |

Tableaux et figures

| | |
|---|-----------|
| <i>Tableau I. Présentation des différentes autorités savantes en matière de nucléaire</i> | <i>50</i> |
| <i>Tableau II. Limites d'exposition sur 12 mois glissants selon les catégories professionnelles.....</i> | <i>52</i> |
| <i>Tableau III. Personnes ressources citées en cas de suspicion de risque consécutif à l'exposition radiologique d'un patient</i> | <i>71</i> |
| <i>Tableau IV. Formats d'informations sur le risque radiologique</i> | <i>72</i> |
| <i>Tableau V. Analyse croisée entre données épidémiologiques et distance à la CNPE de Cattenom</i> | <i>73</i> |
| <i>Tableau VI. Données croisées entre exposition au travail et distance à la CNPE de Cattenom</i> | <i>75</i> |
| <i>Tableau VII. Données croisées entre examens d'imagerie et distance à la CNPE de Cattenom</i> | <i>76</i> |
| <i>Tableau VIII. Données croisées entre situation d'urgence et distance à la CNPE de Cattenom</i> | <i>78</i> |
| | |
| <i>Figure 1. Répartition des médecins selon le délai depuis la fin de leur internat</i> | <i>64</i> |
| <i>Figure 2. Répartition des médecins selon la distance séparant leur lieu d'exercice principal de la CNPE de Cattenom.....</i> | <i>65</i> |
| <i>Figure 3. Proportions de médecins déclarant prendre en compte le risque radiologique dans leur pratique.....</i> | <i>66</i> |
| <i>Figure 4. Proportions de médecins déclarant avoir déjà prescrit un examen complémentaire en pensant à un risque radiologique</i> | <i>67</i> |
| <i>Figure 5. Types d'examens complémentaires prescrits.....</i> | <i>67</i> |
| <i>Figure 6. Proportions de médecins déclarant avoir déjà modifié la prescription d'un examen d'imagerie à cause du risque lié à l'exposition aux rayonnements ionisants.....</i> | <i>68</i> |
| <i>Figure 7. Proportions de médecins déclarant avoir déjà été amené(e) à vous interroger sur la dose de rayonnement ionisant reçue par votre patient lors d'un examen d'imagerie.....</i> | <i>69</i> |
| <i>Figure 8. Proportions de médecins déclarant penser à une cause radiologique devant des symptômes compatibles avec un SAI.....</i> | <i>70</i> |

Liste des abréviations

AEN : Agence pour l'Energie Nucléaire

AIEA : Agence Internationale de l'Energie Atomique

ALARA : As Low As Reasonably Achievable

ANDRA : Agence Nationale pour la gestion des Déchets Radioactifs

ARS : Agence Régionale de Santé

ASN : Autorité de Sûreté Nucléaire

CaDTPA : Acide Diéthylène Triamine PentaAcétique

CE : Communautés Européennes

CEA : Commissariat à l'Energie Atomique

CEEA : Communauté Européenne de l'Energie Atomique

CIPR : Comité International de Protection Radiologique

CNPE : Centrale Nucléaire Productrice d'Electricité

CRRA : Centre de Réception et de Régulation des Appels

CTA : Centre de Traitement de l'Alerte

DREES : Direction de la Recherche, des Etudes, de l'Evaluation et des Statistiques

DTPA : Diéthylène Triamine PentaAcétate

EDF : Electricité de France

G-CSF : Granulocyte Colony-Stimulating Factor

HERCA : Heads of the European Radiological Protection Competent Authorities

ICRU : International Commission on Radiation Units et measurements

INES (échelle) : International Nuclear Event Scale

IRPA : International Radiation Protection Association

IRSN : Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire

LCIE : Laboratoire Central des Industries Electriques

NRBC : Nucléaire, Radiologique, Bactériologique et Chimique

RSDL : Reactive Skin Decontamination Lotion

SAI : Syndrome Aigu d'Irradiation

SCPRI : Service Central de Protection contre les Rayonnements Ionisants

SIGA : Syndrome d'Irradiation Globale Aigu

SRON : Substances Radioactives d'Origine Naturelle

UNGG : Uranium Naturel, Graphite, Gaz

UNSCEAR : United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation

ZOE : puissance Zéro, Oxyde d'uranium et Eau lourde

Introduction

Que nous soyons nés sous la doctrine de « l'équilibre de la terreur » ou pendant la politique de désarmement nucléaire amorcée en 1972, chacun a conscience de l'existence d'une menace nucléaire et radiologique représentée par la bombe atomique. Ce que l'on connaît moins en revanche, c'est le risque radiologique qui est présent en permanence dans la vie de tout un chacun.

Le risque radiologique se définit par l'ensemble des risques liés aux rayonnements ionisants, qu'ils soient d'origine naturelle ou artificielle. Les rayonnements ionisants issus de sources naturelles viennent des rayonnements cosmiques, telluriques et du gaz radon. Parmi les rayonnements artificiels on distingue ceux issus de la médecine et de la recherche, de l'industrie nucléaire, de l'industrie non-nucléaire et de la défense. Le recul des années nous permet aujourd'hui de savoir qu'une exposition anormale, trop intense ou trop prolongée, aux rayonnements ionisants n'est pas anodine sur le plan de la santé et peut même se révéler dangereuse. A l'image d'autres facteurs de risque tels que le tabac ou l'alcool, l'exposition aux rayonnements ionisants doit faire partie des préoccupations des médecins.

En Europe, très peu d'études ont été réalisées sur les connaissances des médecins vis-à-vis du risque radiologique et aucune n'a été réalisée en France. Si l'on sait que seuls 13 % des praticiens hospitaliers estiment correctement la différence de dose entre un scanner et une radiographie [1], il n'existe pas de publications concernant le risque radiologique global, ni de travaux dont la population serait les médecins généralistes. Pourtant, l'imagerie médicale occupe désormais une place fondamentale dans la pratique de la médecine de ville. De plus, depuis la directive européenne Euratom de 2013, les médecins généralistes et non plus seulement les médecins du travail sont susceptibles de recevoir les mesures dosimétriques de leurs patients exposés dans le cadre professionnel [2].

Au regard du risque radiologique, la Moselle se trouve dans une situation singulière. Tout d'abord, on y retrouve la Centrale Nucléaire Productrice d'Électricité (CNPE) de Cattenom qui dispose de 4 réacteurs nucléaires. De plus, elle se distingue par sa situation géographique et le passage anciennement controversé du nuage de Tchernobyl au-dessus du territoire français. Enfin l'activité industrielle présente et passée sur son sol fait d'elle une région d'intérêt en matière d'exposition aux rayonnements ionisants.

Cette absence de données statistiques françaises couplée à la situation particulière du département nous a poussés à nous demander quel était le niveau de sensibilisation des médecins généralistes de

Moselle face au risque radiologique. Cette étude observationnelle a donc eu pour but de décrire le degré d'initiation des praticiens aux grands axes du risque radiologique et d'évaluer les possibilités d'amélioration en matière de formation. Son objectif secondaire a été de rechercher un lien entre le niveau de sensibilisation et l'éloignement de la CNPE de Cattenom.

Généralités

A. Rappels historiques

1. La découverte de l'atome

a. De la Grèce à la fin du XVIIIème siècle : la théorie de l'atome

C'est à Leucippe mais surtout à Démocrite d'Abdère, son élève, que l'on attribue la première définition de l'atome. Ce philosophe grec qui vécut vers – 400 av. J.-C. avait une conception « matérialiste » de l'Univers : il considérait que celui-ci était composé d'atomes séparés par du vide. Les atomes étant les plus petites unités de matière existantes et leur arrangement formant le monde qui nous entoure. Le mot atome vient d'ailleurs du grec *atomos* signifiant « qui ne peut être coupé ». Le manque de preuve étayant cette théorie, pourtant à la base de la physique nucléaire, la fit tomber en désuétude jusqu'à la fin du XVIIIème siècle.

b. Le XIXème siècle et le modèle atomique

En 1803, John Dalton reprit la théorie démocritienne de l'atome qu'il représentait comme des sphères. Il supposait alors qu'un élément était constitué d'atomes identiques entre eux et que chaque élément était composé d'atomes spécifiques. Selon cette théorie, les différents éléments et leurs atomes pouvaient se combiner pour former des composés chimiques, une réaction chimique étant alors un réarrangement des atomes entre eux. Dalton proposa également une évaluation des différentes masses atomiques qui constitua la base du tableau périodique de Mendeleïev que nous connaissons aujourd'hui.

Joseph John Thomson découvrit l'électron en 1897, une particule chargée négativement qui permettait d'expliquer l'équilibre des charges au sein de l'atome et donc sa neutralité. Quelques années plus tard, il proposa un modèle atomique dit du *pudding de prune* : il visualisait l'atome comme une sphère chargée positivement dans laquelle les électrons seraient éparpillés, comme les prunes dans le pudding.

Parallèlement à ces découvertes, Antoine-Henri Becquerel découvrait la radioactivité naturelle en 1896. Il se basait sur les travaux de Wilhelm Röntgen qui venait de découvrir que le verre fluorescent de l'un de ses tubes cathodiques émettait un rayonnement qu'il allait nommer rayons X. Becquerel

souhaitait savoir si l'uranium pouvait lui aussi émettre ce genre de rayonnement et conçut une expérience où il exposait des sels d'uranium au soleil avant de les déposer sur une plaque photographique dans l'obscurité. En développant les plaques photographiques il observa des tâches floues. Il réalisa également le protocole un jour où le temps était nuageux. L'uranium n'était donc pas exposé au soleil mais Becquerel décida tout de même d'aller au bout du protocole et de développer les plaques photographiques. Il constata les mêmes tâches que les fois précédentes : le rayonnement était donc intrinsèque à l'uranium. Pierre et Marie Curie travaillaient également sur ce phénomène qu'ils nommèrent « radioactivité » en 1898.

c. De Rutherford à nos jours : vers la physique nucléaire contemporaine

En 1899, Ernest Rutherford reprit l'expérience de Becquerel et prouva que l'uranium émettait deux types de rayonnements différents : des rayons qui étaient facilement stoppés par la matière qu'il nomma α , ainsi que des rayons plus pénétrants appelés β . Il montra plus tard que ces rayons étaient des particules et qu'il existait deux particules β : les β^- , qui étaient en fait des électrons, et les β^+ qui étaient des électrons chargés positivement appelés positrons. Il participa également à la découverte des « rayons γ ». Mais sa participation à la physique nucléaire ne s'arrêta pas là puisqu'il établit un nouveau modèle atomique en 1911. En bombardant une feuille d'aluminium dans le vide avec des particules α , il observa que celles-ci étaient déviées dans différentes directions. De cela il déduisit que la feuille était composée partiellement de vide. Le « modèle de Rutherford » était né, à savoir un atome composé d'un noyau dense chargé positivement autour duquel gravitent des électrons chargés négativement. [3]

Ce modèle fut complété en 1913 par Niels Böhr qui établit que les électrons gravitaient sur leur orbite dans un état d'équilibre et que le changement d'orbite s'accompagnait de l'émission d'un rayonnement pour passer d'un état stable à un autre. Il définit également les lois physiques qui régissent ces transitions énergétiques. [4]

C'est en 1932 qu'apparaît le modèle atomique que nous connaissons aujourd'hui. En effet, James Chadwick isola la pièce manquante du puzzle, une particule électriquement neutre qui compose le noyau aux côtés des protons : le neutron.

2. Naissance de l'imagerie médicale

Toutes ces découvertes autour de la composition de l'atome et de sa capacité à émettre un rayonnement s'accompagnèrent rapidement d'applications pratiques, c'est ainsi que l'imagerie médicale vit le jour.

Nous avons évoqué plus haut les travaux du physicien Wilhelm Röntgen qui découvrit le premier les applications possibles des rayons X. En passant sa main devant un tube cathodique dans lequel il faisait passer un courant électrique, il se rendit compte qu'il apercevait ses propres os. Il eut alors l'idée d'ajouter au montage une plaque photographique et réalisa ainsi la première radiographie de la main. [5] Si en France la découverte fut initialement perçue comme une curiosité, Outre-Rhin on comprit rapidement son intérêt médical. Ainsi, les premières opérations basées sur une indication médicale par rayons X furent réalisées le 21 janvier 1898 à Vienne et le 9 février à Berlin. L'hôpital militaire Lazaret I de Berlin s'équipa dès février 1896 d'un « cabinet Röntgen » et l'hôpital civil de la Charité suivit au printemps de la même année. [6]

En France, c'est Antoine Béclère, médecin des hôpitaux de Paris, qui introduisit ce qu'on appelait alors la radioscopie à l'hôpital. Après avoir assisté à une démonstration de radioscopie chez des amis, il entrevit son utilité dans le domaine médical et installa à ses frais un appareil à l'hôpital Tenon en 1897. Il est intéressant de noter que la radioscopie entra dans les hôpitaux avant l'électricité. En effet, la machine électrostatique qui générait la haute tension était actionnée à la main à cette époque. De plus, la tension aux bornes de l'ampoule qui générait les rayons X était réglée par un tube de platine qu'il fallait chauffer à l'aide d'un chalumeau. Les premiers « manipulateurs en radiologie » exerçaient alors sans aucune protection. Ils devaient régler toutes les machines et garder un œil sur le chronomètre qui mesurait le temps de pose qui était de plusieurs minutes.

C'est la Première Guerre Mondiale et son flot de blessures par projectiles métalliques qui donna réellement son essor à la radiologie. Grâce aux « petites Curies », des camionnettes mises au point par Marie Curie et équipées de matériel radiologique, la radiologie s'exporta au plus près du front. A la fin du conflit, les chirurgiens ne pouvaient plus se passer de ce guidage qui leur permettait de localiser les corps étrangers rapidement. L'équipement en appareils de radioscopie se généralisa dans les hôpitaux et les cliniques et les premières formations pour radiologues et manipulateurs apparurent.

A partir de cette époque les appareils de radioscopie connurent de nombreuses améliorations techniques. William Coolidge remplaça les ampoules à rayons X « à gaz » par des tubes à émission thermo-ionique plus performants et plus réglables à partir de 1920. Un film souple en nitrate de cellulose apparut également pour remplacer les produits photographiques et les lourdes plaques de verre initialement utilisées. Il fut lui-même remplacé et dans les années 60 on commença à utiliser les films en dérivés de polyvinyles. D'autres inventions telles que les écrans renforçateurs qui augmentent le rendement des films et le « potter » (du nom de son inventeur) qui améliore la netteté des clichés permirent d'aboutir à l'appareil de radiographie que nous connaissons aujourd'hui.

Dans les années 60, Allan Mc Cornack et Godfrey Hounsfield bénéficièrent des progrès de l'informatique et mirent au point un appareil permettant de réaliser des images en coupes du crâne à partir des mesures effectuées sur une source de rayons X qui tournait autour de ce crâne. C'était la naissance de la scanographie ou tomodynamométrie, et le premier scanner fut installé en 1971 à l'hôpital de Wimbledon. Hounsfield donna son nom aux unités de l'échelle de densité des images obtenues grâce au scanner et les deux hommes reçurent le prix Nobel en 1979 pour leur découverte. Les modèles permettant l'examen du corps entier apparurent dans les années 90. Depuis les appareils ne cessent de se perfectionner pour permettre une amélioration des coupes et de la reconstitution 3D.

3. Fission nucléaire et exploitation industrielle

En 1938, une équipe composée d'Otto Hahn, Fritz Strassmann, Lisa Meitner et Otto Frisch découvrit du baryum dans un échantillon d'uranium qu'ils avaient bombardé de neutrons. Ils en conclurent alors que le noyau de l'uranium s'était cassé et découvrirent que cette réaction, la fission nucléaire, émettait une grande quantité d'énergie. Frédéric Joliot et Irène Curie qui avaient également travaillé sur ce sujet mais sans oser émettre l'idée d'un noyau fissible donnèrent le nom de « radioactivité artificielle » aux produits ainsi obtenus.

Dès l'année suivante, Frédéric Joliot, Hans Halban et Lew Kowarski mirent en évidence que cette réaction de fission de l'uranium produisait également des neutrons de haute énergie. Il était donc possible d'obtenir une réaction en chaîne génératrice d'énergie. Mieux encore, 1 % des neutrons produits par cette réaction étaient émis à retardement. Cela signifiait qu'en créant un montage où tous les neutrons émis étaient nécessaires à la réaction en chaîne, le processus pouvait être contrôlé dans le temps mais aussi être interrompu. Les trois hommes déposèrent alors en mai 1939 trois brevets auprès du Centre National de la Recherche Scientifique qui furent à la base de la construction des réacteurs nucléaires. [7]

L'invasion de la France par les troupes nazis stoppa toute recherche sur les réactions en chaîne. Mais dès 1945, après l'explosion des bombes atomiques sur Hiroshima et Nagasaki, Frédéric Joliot convainquit le Général de Gaulle de l'importance de la reprise des recherches sur la fission nucléaire. Le Commissariat à l'Energie Atomique fut alors créé. L'enjeu de la maîtrise de l'énergie atomique était double : construire une bombe atomique pour asseoir la position géopolitique de la France, mais aussi tirer avantage de cette incroyable source d'énergie à l'heure où la plupart des foyers français n'étaient pas encore équipés de l'électricité. La première étape fut la construction d'une pile à eau lourde dans l'ancien fort de Châtillon, mise en marche en 1948. Elle prit le nom de ZOE pour « puissance Zéro, Oxyde d'uranium et Eau lourde », du nom de ses composants. Un centre de recherche nucléaire, initialement dirigé par Joliot, fut ensuite créé près de Saclay. C'est là que des piles plus puissantes, un cyclotron et de nombreux laboratoires liés à la recherche nucléaire virent le jour.

Ce sont les Etats-Unis qui produisirent les premiers de l'électricité à partir d'un réacteur nucléaire en décembre 1951 à Arco dans l'Idaho. La France suivit le mouvement en 1957 avec un réacteur dit UNGG (Uranium Naturel, Graphite, Gaz). Six réacteurs de ce type furent mis en fonction entre 1963 et 1972. Puis une nouvelle génération de réacteurs à eau sous pression apparut en 1969 et connut un essor phénoménal après 1973 et le premier choc pétrolier. C'est aussi à cette période que fut créée l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN). Au fil du temps, la France se dota également de toutes les installations nécessaires au cycle du combustible nucléaire. L'Agence Nationale pour la gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA) fut créée en 1995. En 2017, 72 % de l'électricité produite en France était d'origine nucléaire. [8]

4. Les accidents nucléaires et radiologiques à travers l'Histoire

Dans les années 80, la nécessité d'une échelle de classement des incidents ou accidents nucléaires se fit sentir pour permettre au grand public de mieux appréhender les différents événements relatés par les médias. Fruit d'une collaboration entre l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (IAEA) et l'Agence pour l'Energie Nucléaire (NEA), l'International Nuclear Event Scale, dite INES, vit le jour en 1990 [9]. L'échelle s'applique aux événements survenant dans les installations nucléaires civiles et militaires et lors du transport des matières nucléaires. Trois critères de classement déterminent le score sur l'INES :

- Les conséquences à l'extérieur du site sur le public et l'environnement
- Les conséquences à l'intérieur du site sur les travailleurs et l'installation

- La dégradation des lignes de défense en profondeur de l'installation, soit les mécanismes de protection en cas d'évènement anormal.

L'échelle comporte 8 niveaux de 0 à 7. Les niveaux 1 à 3 correspondent à des « incidents » et les niveaux 4 à 7 à des « accidents » [10]. A partir du niveau 5 on parle d'accident nucléaire majeur, soit un évènement conduisant à un début de fusion du cœur de l'installation nucléaire. C'est la quantité d'éléments radioactifs rejetés à l'extérieur de l'installation qui va différencier les niveaux 6 et 7 [11].

a. Accidents à caractère militaire : l'exemple de Palomares 1966 [12]

La période de la Guerre Froide était très propice au développement de nombreuses armes, dont les armes atomiques. Ces bombes thermonucléaires furent testées, stockées et transportées dans des sous-marins et des avions. Leur plus grand nombre et surtout leur déplacement augmentait nécessairement le risque d'accident.

C'est le cas de l'accident de Palomares en Espagne qui fut le premier accident impliquant des avions. Le 17 janvier 1966, deux avions de l'armée de l'air américaine, un bombardier et un ravitailleur, entrèrent en collision au-dessus de la petite ville espagnole. Le bombardier transportait 4 bombes H dont la puissance était un millier de fois supérieure à celle de la bombe lâchée sur Hiroshima. Plus de 3000 hommes, des avions, des sous-marins, des hélicoptères et plusieurs navires de guerre furent mobilisés par les Etats-Unis pour les retrouver. Deux bombes furent récupérées intactes, dont une tombée dans l'océan mais retrouvée 80 jours plus tard grâce aux indications d'un pêcheur qui avait assisté au crash. En revanche, les deux autres furent endommagées par la chute et le plutonium qu'elles contenaient prit feu. Outre la contamination atmosphérique, 126 ha de sols cultivés ou habités furent contaminés malgré les 1 600 000 tonnes de terres prélevées sur place et envoyées aux Etats-Unis pour y être stockées.

Le Centre de Recherche Energétique espagnol mit en évidence dans les années 2000 que les sols étaient toujours contaminés. Bien que les taux de plutonium détectés étaient inférieurs à la limite de dangerosité, le Conseil National de Sécurité Nucléaire prononça l'expropriation des terrains qui avaient été construits pour permettre leur nettoyage [13].

b. Accidents de réacteur : l'exemple de Tchernobyl 1986

Parmi les différents accidents de réacteurs nucléaires auxquels l'Homme a dû faire face depuis le XXème siècle, aucun ne s'est produit au cours du fonctionnement normal des centrales. Chaque fois,

c'est dans un cas de figure s'éloignant de la routine des centrales que se produisirent les accidents. Dans la plupart des scénarios, il s'agit d'opérations de maintenance. Dans l'exemple qui nous intéresse ici, l'opération de maintenance couplée à la mauvaise conception des installations et aux très nombreuses erreurs humaines ont conduit à la catastrophe.

L'accident de Tchernobyl du 26 avril 1986 est classé de niveau 7 sur l'échelle internationale d'événement nucléaire. Les autorités soviétiques cherchaient à déterminer si le redémarrage d'un réacteur était possible grâce à l'énergie cinétique d'un groupe turbo-générateur, semblable à un groupe électrogène géant. Pour tester cette hypothèse, ils demandèrent aux opérateurs du réacteur numéro 4 de réduire au maximum la puissance de celui-ci. Hors, ce type de réacteur devenaient instable à très basse puissance. Malgré le déclenchement de plusieurs systèmes d'alarme, les opérateurs poursuivirent la manœuvre. L'instabilité du réacteur mena à une surchauffe, à la fonte des combustibles et surtout à la production d'une quantité importante de vapeur d'eau qui fit sauter le couvercle de 1000 tonnes du réacteur. Par mise en contact de différents éléments, une explosion se produisit et les fumées dégagées par l'incendie entraînent avec elles des particules radioactives [14]. Ainsi, l'équivalent de 30 % de la radioactivité du réacteur fut libérée dans l'atmosphère [11].

Près de 600 000 « liquidateurs » furent mobilisés entre 1986 et 1990 pour éteindre les incendies, refroidir la structure et construire le fameux sarcophage de béton autour du réacteur. Les conséquences immédiates furent l'évacuation de 135 000 personnes, le recensement de 134 cas de syndromes d'irradiation aiguë dont 47 décédèrent et la contamination de 30 000 km² par du césium à plus de 185 kBq/km².

Les analyses menées sur les données des liquidateurs n'ont pas permis de mettre en évidence une augmentation significative du nombre de cas de leucémie. Les études souffrent souvent du manque de confirmation du diagnostic ou d'autres limites méthodologiques. L'augmentation de la survenue des cancers de la thyroïde chez les enfants est la seule qui ait pu être mise en évidence. Dans les années qui ont suivi l'accident, l'incidence des cancers de la thyroïde chez les enfants qui avaient moins de 5 ans en 1986 a été multiplié par 9 [15].

De plus, les rejets radioactifs atmosphériques ont été transportés par les vents sur la majorité de l'Europe. En France, les effets sanitaires sont non démontrables. Mais l'IRSN estime qu'entre 1986 et 2006, les habitants de l'est de la France auraient reçu une dose efficace de l'ordre de 4,5 mSv [12].

c. Sources radioactives à usage industriel : l'exemple de Forbach 1991

Les sources radioactives sont utilisées dans de nombreux domaines industriels. Ces sources sont normalement stockées dans des conteneurs conçus à cet effet et leur utilisation relève de protocoles assurant la protection des travailleurs réglementés par la Loi. Deux types d'accidents d'origine industrielle ont été rapportés : la sortie de son conteneur d'une des sources radioactives et le non-respect des mesures de sécurité. Dans le premier cas de figure, la matière radioactive peut sortir de son conteneur par inadvertance lors d'une manipulation ou lors du démantèlement peu soigneux d'une installation. Le risque étant alors qu'elle soit trouvée par des personnes qui ne sont pas au courant de sa dangerosité et se brûlent à son contact. Le deuxième cas de figure, peut être illustré par l'accident survenu à Forbach en 1991.

Le 23 août, le médecin du travail d'une usine de Forbach appela le SCPRI (Service Central de Protection contre les Rayonnements Ionisants) pour signaler que deux agents présentaient des rougeurs inexplicables. Elle fit expédier leurs dosimètres au LCIE (Laboratoire Central des Industries Electriques) et demanda une lecture en urgence. Les dosimètres révélèrent une exposition à des doses plus de 10 fois supérieures aux limites réglementaires. Le SCPRI demanda l'hospitalisation des deux hommes qui furent admis à l'hôpital de Forbach dans un premier temps. Les deux agents impliqués étaient des intérimaires et une troisième personne, le contremaître, était susceptible d'avoir été exposée.

L'installation, qui avait démarré en juillet 1991, était conçue pour réduire en poudre des billes de téflon placées sur un tapis roulant et exposées à de très fortes doses d'électrons. Depuis le 12 août, un des plateaux du tapis roulant ne cessait de se coincer dans son cheminement. Pour le décoincer, un agent entra dans l'enceinte par l'orifice de sortie du tapis roulant pour ne pas déclencher les alarmes de sécurité présentes sur la porte du local. En effet, si on l'arrêtait complètement ou que les systèmes de sécurité se déclenchaient, il fallait plus d'une heure pour redémarrer la machine. Le contremaître décida donc de ne pas éteindre complètement l'irradiateur mais de diminuer au maximum son intensité sans toucher à la tension. Néanmoins dans ces conditions persistait ce que l'on appelle un « courant froid » dont l'émission est de quelques Gy/s. Cette opération fut répétée à plusieurs reprises, exposant les trois hommes à des degrés divers.

Les deux intérimaires furent transférés à l'hôpital militaire de Percy au service des grands brûlés. Ils présentaient des brûlures de 2^{ème} et 3^{ème} degré, sur près de 60% de la surface corporelle pour le plus touché des deux. L'enquête révéla de nombreux manquements : pas de contrôle par un organisme agréé

avant la première utilisation du système, manque de formation des employés, méconnaissance du fonctionnement de l'installation et de sa potentielle dangerosité, etc. Le responsable, le PDG et l'administrateur de l'entreprise furent condamnés à des peines de prison. Les deux intérimaires subirent plusieurs greffes de peau et l'un d'eux décéda quelques années plus tard à l'âge de 42 ans [16].

d. Accidents de criticité : l'exemple de Tokai Mura 1999

L'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN) définit un accident de criticité comme : « le démarrage d'une réaction nucléaire non contrôlée lorsque la masse de matière nucléaire dépasse un certain seuil, appelé masse critique » [17]. Cette quantité suffisante de matière fissile est donc le premier élément d'un accident de criticité, mais une structure géométrique ainsi qu'un environnement inadéquat sont également nécessaires. Tout cela réuni va provoquer une explosion violente, l'émission intense de neutrons et de rayons gamma ainsi que la libération dans l'environnement de produits de fission radioactifs [12]. Ces phénomènes concernent les laboratoires et les usines du cycle du combustible, les réacteurs de recherche et les transports de matière fissile. On estime que le risque d'accident existe lorsque les matières mises en présence contiennent du plutonium et ou de l'uranium enrichi à plus de 1 % en uranium 235 [18].

L'accident qui se produisit le 30 septembre 1999 à Tokai Mura au Japon en est un parfait exemple. Cet événement survint dans une usine de traitement de l'uranium, dans un atelier qui s'occupait de l'enrichir pour en faire un combustible pour réacteurs de recherche. En négligeant l'une des étapes de la réaction, les employés dépassèrent de plus de 7 fois la masse nécessaire pour atteindre la criticité. La veille, 9.2 kg d'uranium enrichi à 18.8 % avaient été déposés dans un dissolvant. Pour gagner du temps, les techniciens y ajoutèrent ensuite trois charges de 2.3 kg de ce même uranium ce qui déclencha la réaction en chaîne. Après 19 h où se succédèrent des phases critiques et non critiques, le processus put être stoppé par la vidange de l'eau du circuit de refroidissement et par l'injection de bore (absorbant de neutrons) dans la cuve.

On dénombra 439 personnes irradiées, dont 69 exposées directement lors de l'accident. Les autres intervenants cherchant à arrêter la réaction furent soumis à des doses contrôlées. 3 employés subirent un syndrome d'irradiation global aigu sévère avec des doses allant de 1.2 à 9 Gy pour le plus grave. Ils bénéficièrent d'une technique de greffe de moelle osseuse alors novatrice (l'injection de cellules hématopoïétiques immatures d'un donneur), ce qui permit de sauver 2 des opérateurs. La radioactivité environnante fut évaluée à 4 000 fois le niveau de base [19].

On constata ici, comme souvent, une carence de formation des personnels aux protocoles de réalisation de leur travail ainsi qu'aux mesures de sécurité. De plus, l'usine présentait une carence dans ses installations notamment avec un dissolvant de taille non adaptée et une absence de stock de bore à disposition. De nos jours, des plaques de béton et des sacs de sable sont placés autour du bâtiment abritant l'atelier pour arrêter le rayonnement dû à la radioactivité résiduelle [20].

e. Sources radioactives à usage médical : l'exemple de Goiana en 1987 et d'Epinal en 2004

Dans cette catégorie des accidents causés par une source radioactive d'origine médicale sont détaillés deux cas de figure. D'abord le cas de l'accident de Goiana qui a impliqué une source secondairement descellée, puis le scénario des « Sur-irradiés d'Epinal » avec une source maintenue scellée.

En septembre 1987 à Goiana au Brésil, une clinique de radiothérapie changea de locaux en laissant derrière elle une source de Césium 137 sans en aviser les autorités compétentes. Peu après la destruction partielle de la clinique, deux hommes récupérèrent le barillet qui contenait le Césium 137 sous forme de poudre. Ils tentèrent de démonter le barillet, ce faisant ils mirent la poudre à jour et subirent une contamination externe avec risque d'internalisation en plus de l'irradiation externe initiale. Peu après, le barillet fut revendu à un ferrailleur qui remarqua que la poudre émettait une lumière bleutée dans le noir. Amis et famille furent donc invités à venir constater cet étrange phénomène et certains emportèrent même un grain de césium chez eux. Cinq jours après l'apparition de troubles gastro-intestinaux chez de nombreuses personnes, après avoir initialement relié ses troubles à une maladie tropicale, le service de santé publique de la ville émit l'hypothèse d'une origine radiologique aux symptômes [21]. Au total, cet accident coûta la vie à 4 personnes ayant reçu des doses de 4 à 6 Gy, 3500 m³ de déchets radioactifs furent produits et l'impact psychologique sur la population fut énorme. La décontamination dura jusqu'en mars 1988 [22].

En ce qui concerne l'accident d'Epinal, celui-ci a eu lieu entre mai 2004 et mai 2005 dans un centre hospitalier. Plusieurs erreurs furent commises, la première étant la mauvaise utilisation du logiciel de planification du traitement. Ainsi sur un an, 24 patients atteints de cancers de la prostate subirent une sur-irradiation de 20 %. Ensuite les doses reçues lors des séances de contrôle de positionnement ne furent pas comptabilisées. Et enfin dans les années 90, le mauvais paramétrage d'un second logiciel conduisit à des temps d'irradiation un peu plus longs. Ces erreurs répétées pendant des années menèrent près de

300 personnes à recevoir un excès de dose potentiellement dommageable sous forme de rectites et de cystites radiques notamment [23]. A ce jour, l'accident d'Epinal est le plus important du genre enregistré en France [24].

B. Notions fondamentales [25]

1. Définition de l'atome et grandeurs

a. Constitution (numéro atomique)

Dans l'univers, toute matière est composée d'atomes. Ces atomes sont eux-mêmes des éléments composés d'un noyau autour duquel gravitent des électrons. Le noyau a un diamètre avoisinant les 10^{-15} m et est formé par l'association de protons et de neutrons qui définissent à eux deux la famille des nucléons. On sait aujourd'hui que ces nucléons sont encore divisibles en entités appelées les quarks et les gluons mais ces dernières ne seront pas détaillées ici. Les électrons qui gravitent autour du noyau forment le nuage électronique de l'atome d'environ 10^{-10} m de diamètre. Ces échelles de distance entre noyau et nuage électronique font que l'atome est principalement composé de vide. Les neutrons ne possèdent pas de charge, les protons sont chargés positivement et les électrons négativement.

Un atome se définit avant tout par son noyau, car c'est sa partie immuable. Si le noyau change, alors ce n'est plus le même atome. Pour représenter les atomes, on utilise la notation A_ZX .

- X représente l'élément, par exemple Cu pour le cuivre.
- A est le nombre de masse, soit le nombre de nucléons, car ce sont eux qui confèrent à l'atome sa masse.
- Z est le nombre atomique, il désigne le nombre de protons dans le noyau.

Grâce à ces deux notions A et Z on peut déduire le nombre de neutrons N. C'est-à-dire que $N = A - Z$. Cette représentation des atomes permet notamment de les ranger par ordre croissant de numéro atomique dans la classification périodique des éléments chimiques ou tableau de Mendeleïev. On désigne par le terme de « particule » ces différents éléments de l'atome.

b. Période

On parle de tableau périodique des éléments chimiques car chaque ligne du tableau représente ce que l'on appelle une période.

Autour du noyau, les électrons se répartissent sur des couches électroniques qui peuvent contenir chacune un nombre d'électrons défini par le modèle de Bohr. Ainsi la première couche peut contenir jusqu'à 2 électrons, la deuxième couche peut en contenir 8, etc... Les couches électroniques se remplissent de la plus proche du noyau à la plus éloignée et la dernière couche de chaque atome contenant des électrons est appelée la couche de valence. Les électrons présents sur cette couche de valence sont donc les électrons de valence. Ce sont ces électrons qui pourront interagir avec ceux des autres atomes.

Les éléments d'une même ligne du tableau périodique ont tous la même couche de valence et les éléments d'une même colonne le même nombre d'électrons de valence. Les éléments d'une même colonne forment donc des « familles d'éléments » car ils disposent du même nombre d'électrons pour interagir ainsi que des propriétés chimiques proches.

En ce qui concerne la fission nucléaire, c'est-à-dire la séparation d'un noyau en deux noyaux comportant moins de nucléons sous l'effet de l'interaction avec une particule, la période désigne le temps que met l'activité d'un atome à diminuer de moitié. On parle également de demi-vie de l'atome, son unité est donc une unité de temps allant de la seconde au milliard d'années.

c. Activité

Un noyau est considéré comme stable lorsque la force nucléaire qui attire les nucléons entre eux est compensée par la force électromagnétique qui repousse les protons du fait de leur charge positive. Cet état porte le nom de « vallée de la stabilité ».

Tous les éléments dont le numéro atomique est supérieur à 82 sont instables, c'est-à-dire que les forces ne s'équilibrent pas. Ces noyaux vont chercher à devenir stables en se débarrassant d'une partie de leur énergie sous la forme d'émission de particules ou de rayons de hautes énergies, ce sont les noyaux radioactifs. La désintégration désigne la transformation d'un noyau radioactif en un autre noyau avec émission d'énergie ; elle est spontanée et aléatoire.

L'activité d'un échantillon radioactif est le nombre de désintégrations qui se produisent en une seconde dans cet échantillon. Elle se mesure en Becquerel (Bq).

A l'issue d'une période, l'activité est divisée par deux.

d. Notion de dose (absorbée, équivalente et efficace)

Pour pouvoir décrire l'influence d'un rayonnement sur le vivant, il faut introduire les notions de dose.

On parle d'abord de dose absorbée pour décrire la quantité d'énergie déposée dans la matière par le rayonnement. Elle est mesurée en Gray (Gy) : pour un être vivant c'est l'équivalent d'un joule d'énergie absorbée par un kilogramme de tissu. Dans l'industrie, les doses absorbées sont mesurées en milligray et en microgray. En imagerie, une radiographie thoracique engendrera une dose absorbée d'environ 20 microgray, alors qu'un scanner thoracique induit une dose absorbée de 5800 microgray. C'est la seule dose qui peut être mesurée physiquement.

Ensuite on prend en compte le type de rayonnement qui est reçu. En multipliant la dose absorbée par un coefficient relatif à chaque type de rayonnement on obtient la dose équivalente. Son unité est le Sievert (Sv). Dans l'industrie ou la médecine l'échelle de grandeur est de l'ordre du millisievert ou du microsievert. La dose absorbée ne peut être mesurée, elle est calculée.

Enfin, pour prendre en compte le tissu qui reçoit le rayonnement, on calcule la dose efficace. La dose efficace est la somme des doses équivalentes reçues par chaque type de tissu et pondérées par un coefficient propre à chaque tissu. Le coefficient tissulaire n'ayant pas d'unité, la dose efficace se mesure également en Sievert.

Les doses absorbées en Gy ont des effets aigus sur la matière avec pour conséquence les effets déterministes. Les doses équivalentes et efficaces en Sv sont utilisées en radioprotection pour la mesure des effets stochastiques.

2. Types de rayonnements

a. Chargés lourds

Les particules Alpha (α) et les protons composent la classe des rayonnements chargés lourds.

Les particules α sont similaires à des noyaux d'hélium, c'est-à-dire composées de 2 protons et de 2 neutrons. Elles sont donc porteuses de 2 charges élémentaires positives. Lorsqu'elles se déplacent, les

particules α perdent une grande quantité d'énergie et vont donc pouvoir parcourir une distance limitée. Cette énergie va ioniser les atomes qui se trouvent sur son passage et cela peut créer des ionisations secondaires. Certains éléments naturels comme l'uranium sont naturellement producteurs de particules α . Une simple feuille de papier suffira à arrêter ce type de rayonnement en absorbant l'énergie restante. Sur le plan médical, seules les contaminations internes sont susceptibles de représenter un danger car ce sont les organes qui absorberaient cette énergie. Le radon est par exemple un émetteur α présent sous forme gazeuse et dangereux lorsqu'il est inhalé par contact direct avec le système respiratoire.

Nous avons vu que les protons sont les éléments chargés positivement qui constituent pour moitié le noyau atomique. Ce sont des particules très lourdes qui se comportent comme les particules α , à savoir qu'elles ne peuvent parcourir qu'une distance finie. C'est au bout de cette distance déterminée que ces particules libèrent leur plus grande quantité d'énergie. La production d'un faisceau de protons en protonthérapie est utilisée pour le traitement des tumeurs car l'énergie libérée en fin de parcours va déstabiliser les atomes des cellules cancéreuses et permettre leur destruction.

b. Chargés légers

Les rayonnements chargés légers sont les rayonnements Beta (β) qui sont émis lors de l'expulsion d'un électron ou d'un positron (équivalent positif d'un électron). Ces rayonnements peuvent être plus ou moins chargés en énergie. Ils sont généralement arrêtés par des matériaux légers comme l'aluminium. Une protection complémentaire est parfois nécessaire pour les rayonnements chargés en énergie ; énergie qui sera libérée au moment de la décélération de la particule.

c. Non chargés

On distingue deux catégories de rayonnements non chargés : les rayonnements photoniques et les rayonnements neutroniques.

Les rayonnements photoniques sont représentés par les rayons Gamma (γ) et les rayons X. Les rayons γ sont les rayonnements électromagnétiques produits lors de la désintégration d'un noyau atomique. Ce sont des rayonnements fortement chargés en énergie et chaque désintégration produit des rayons γ qui lui sont propres. Les rayons X, plus connus, sont émis par un électron passant à côté d'un atome. La trajectoire de cet électron va se trouver déviée et ce changement de direction s'accompagne d'une perte d'énergie sous la forme d'un rayon X. Ce rayon peut traverser le corps humain et sera plus

ou moins arrêté en fonction de la densité électronique de ce qu'il traverse. Ces deux types de rayonnements sont très irradiants mais l'élément dont ils sont issus sera moins contaminant.

Les rayonnements neutroniques sont issus de la fission naturelle ou artificielle des noyaux avec émissions de neutrons. Lorsqu'ils sont très chargés en énergie, ces neutrons peuvent être extrêmement irradiants.

3. Interaction des rayonnements avec la matière

a. Effet photoélectrique

L'effet photoélectrique se produit lorsqu'un photon vient heurter un électron gravitant autour d'un noyau. Si l'énergie portée par le photon est supérieure à l'énergie de liaison de l'électron à son atome, on assistera à l'émission d'un photoélectron porteur d'une énergie égale au différentiel des deux énergies précédentes. Ce sont surtout les électrons des couches électroniques les plus proches du noyau qui sont concernées par cet effet. La nature ayant horreur du vide, les électrons restants vont changer de couche et se réarranger de manière à remplir de nouveau les couches les plus profondes de l'atome. L'énergie nécessaire à retenir un électron des couches profondes étant moins importante que celle nécessaire pour retenir les électrons des couches superficielles, l'énergie restante va être émise sous forme de rayons X et parfois d'électrons appelés électrons Auger-Meitner. Ce phénomène d'effet photoélectrique est surtout retrouvé avec les rayons gamma de basses énergies.

b. Effet Compton

A la différence de l'effet photoélectrique, l'effet Compton va produire un photon et un électron. En effet, lorsque le photon X ou gamma vient heurter l'électron relié à l'atome, celui-ci va lui céder une partie de son énergie et être dévié entre 0 et 180 degrés. L'énergie cédée va décrocher l'électron de l'atome et le propulser vers l'avant. On pourra également assister à l'émission secondaire d'électrons Auger-Meitner. En radiographie, l'effet Compton prédomine dans tous les tissus et donne un fond uniforme à toute l'image à l'exception de l'os dans lequel c'est l'effet photoélectrique qui domine. Les os ne retransmettant pas de photons, l'image formée par eux sera dite radio-opaque. Au contraire, les zones où l'effet Compton est plus important et où un nombre important de photons est transmis seront radio-claires.

c. Création de paires

Lorsqu'un photon frappe le noyau d'un atome, on assiste au phénomène de création de paires. C'est-à-dire que le photon va être transformé en une particule et son antiparticule. Dans le cas présent il s'agit d'un électron et d'un positron. Ce phénomène ne peut se produire que pour les photons de haute énergie. En effet, l'électron au repos est porteur d'une énergie égale à 511 keV ; donc pour produire un électron et un positron le photon doit être porteur d'une énergie au moins égale à 1.022 MeV. En rencontrant un autre électron du milieu, le positron émis va engendrer la création de deux nouveaux photons dits « d'annihilation » de 511 keV chacun qui vont être émis chacun dans deux directions opposées.

C. Effets sur l'organisme

1. Contamination interne, contamination externe et irradiation

L'exposition aux rayonnements ionisants provient des phénomènes de contamination et/ou d'irradiation.

On parle de contamination lorsque la substance radioactive est en contact direct avec le corps ou l'objet concerné. Pour les êtres vivants, on distingue ainsi la contamination interne de la contamination externe.

La contamination interne fait référence à la pénétration d'une substance radioactive à l'intérieur de l'organisme. Elle peut y entrer par inhalation, ingestion ou passage transcutané. Les radionucléides seront alors métabolisés selon des processus dépendant de leur nature physicochimique, de leur solubilité et de leur tropisme pour un tissu. La mesure de la contamination interne peut se faire selon deux méthodes. La première est la mesure de l'excrétion des radionucléides par analyse radiotoxicologique. Cette technique consiste à recueillir les urines et les selles des sujets contaminés afin de déterminer le type d'émission radioactive et de le mesurer. Elle a pour avantage de permettre la détection de tout type de rayonnement ionisant. Toutefois dans le cas de figure où le radiocontaminant serait inconnu, le critère d'urgence pousserait à préférer la technique anthroporadiométrique. Il s'agit de détecter les rayons X et γ émis par les radionucléides ce qui permet de les identifier et d'estimer la dose initialement absorbée. Les mesures anthroporadiométriques sont plus rapides et imposent moins de logistique car elles ne

nécessitent pas de prélèvement biologique. Mais elles ont aussi certaines limites, à savoir quelles ne détectent pas les rayons α et β car ils ne traversent pas la barrière cutanée. Ces ne peuvent être mises en place qu'une fois la décontamination externe effectuée pour ne pas fausser les mesures. [26]

La contamination externe désigne la présence de substance radioactive sur la peau, les phanères et les vêtements du sujet. Comme nous l'avons vu plus haut, cette contamination s'avère dangereuse lorsque ce sont des rayons X ou γ qui sont émis car les rayons α ne traversent pas la couche cornée. Quant aux rayons β ils peuvent occasionner des brûlures mais ne pénètrent que de quelques millimètres dans les chairs. Les protocoles de décontamination des victimes radiocontaminées comportent tous les mêmes étapes : fixation, déshabillage et décontamination. Une détection de radionucléides a lieu entre chacune de ces étapes pour identifier les zones du corps contaminées. La fixation consiste par exemple à pulvériser de l'eau sur les zones où les radionucléides sont présents pour limiter la dispersion des poussières. En ce qui concerne les plaies contaminées on pourra les emballer dans des feuilles de tarlatane pour empêcher la dissémination des radionucléides. Le déshabillage permet de retirer les vêtements contaminés du sujet sans le mettre en contact avec les radionucléides qui se trouvent dessus. En cas de décontamination urgente, on procédera au déshabillage et à l'application de *Reactive Skin Decontamination Lotion*. Dans le cadre d'une décontamination approfondie, on procédera au déshabillage puis à la douche avec de l'eau et du savon doux. Pour toutes ces étapes, l'enjeu est le recueil rigoureux des radionucléides présents sur les vêtements des intervenants et dans l'eau de la décontamination.

Enfin, l'irradiation est l'exposition des sujets aux rayonnements ionisants émis par les radionucléides. Les dommages induits par les rayons dépendront alors de trois paramètres qui sont le temps, la distance et les écrans. Pour limiter l'irradiation, le temps d'exposition doit bien sûr être le plus court possible et la distance la plus grande possible. On entend par écran toute protection matérielle disposée entre la source de rayonnement et le sujet susceptible d'arrêter ou d'atténuer les rayons émis.

2. Effet stochastique

On désigne par le terme d'effet stochastique les effets induits par la mutation imprévisible des cellules irradiées. Ces effets existent théoriquement sans seuil de dose, mais plus la dose reçue est grande plus les effets stochastiques risquent d'apparaître. En revanche, étant donné le caractère imprévisible des mutations, la gravité et l'évolution des lésions induites ne peuvent pas être anticipées. Ils sont retrouvés expérimentalement pour une exposition à des doses de rayonnements ionisants supérieures à 100 ou 200 mSv. Les rayonnements agissent sur l'eau présente dans le corps et créent des radicaux libres qui vont

induire des modifications de l'ADN comme la lésion d'une base, une cassure simple brin et/ou une cassure double brin. De façon moins importante, les rayons peuvent ioniser les molécules d'ADN et provoquer les mêmes dégâts. L'ADN ainsi modifié peut être totalement restauré, ce qui n'a pas d'impact sur la cellule. Il peut conduire à la mort cellulaire, ce qui peut avoir un impact tissulaire si la lyse cellulaire concerne un grand nombre de cellule. Enfin, l'ADN peut être partiellement restauré, ce qui va induire les effets stochastiques. Mais l'altération de l'ADN n'est pas le seul effet de l'irradiation. Elle va également toucher la communication intercellulaire, le fonctionnement de la membrane cellulaire et la production de cytokines. Tous ces phénomènes participeront au final à la propagation de l'inflammation [27].

Les effets stochastiques peuvent être des effets somatiques, des effets in utero ou des effets génétiques. Les effets somatiques concernent les personnes exposées. La restauration partielle de l'ADN conduit alors principalement à des cancers dits radio-induits. Les effets in utero sont basés sur le même principe biologique mais concernent les embryons ou fœtus en développement. On parle d'effets génétiques pour les mutations de l'ADN qui concernent des cellules germinales, le rayonnement augmenterait le taux de mutation spontanées ce qui conduirait à des malformations dans la descendance de la personne exposée aux rayonnements. Si cet effet est prouvé chez la souris, il semblerait qu'il ne soit pas observé chez l'Homme [28].

3. Effet déterministe

L'effet déterministe apparaît au-delà d'une dose seuil de quelques Gray et est prévisible. Pour les rayons X et γ , la dose seuil est de 0.15 Gy [29]. Pour une dose donnée, toutes les personnes exposées présenteront des symptômes similaires. La gravité des effets augmente avec la dose reçue et les symptômes vont apparaître dans les heures, les jours ou les semaines suivant l'exposition. Les lésions sont causées par la mort massive de cellules irradiées, elles apparaissent d'abord au niveau des tissus les plus radiosensibles. Ces tissus correspondent à ceux dont la division cellulaire est la plus rapide, à savoir le système hématopoïétique, le système gastro-intestinal et le système neurologique.

a. Syndrome d'irradiation aigue localisée

Le syndrome d'irradiation aigue localisée ou syndrome cutané radio-induit désigne les lésions cutanées provoquées par l'irradiation. Pour pouvoir parler de lésion localisée, l'érythème doit s'étendre sur moins de 18 % de la surface corporelle. Au-delà de ce seuil on parlera d'irradiation globale [30]. En fonction de la dose reçue, les lésions vont de l'érythème à la nécrose sous-cutanée profonde. Tout

syndrome d'irradiation aigu localisé va commencer par une radiodermite, similaire à une brûlure du 1^{er} degré. D'autres symptômes vont apparaître en fonction de la dose reçue : « *On peut observer successivement un érythème précoce, un érythème secondaire, une desquamation sèche, un œdème sous-cutané plus ou moins étendu suivi d'une radioépithéliite exsudative, puis une ulcération pendant et au décours de l'irradiation, qui peut évoluer après quelques mois en une zone d'atrophie et/ou fibrose sous-cutanée...* » [26].

Toutes ces lésions occasionnent des sensations de brûlures qui sont résistantes aux morphiniques et elles peuvent s'accompagner de symptômes neurologiques tels que des paresthésies ou des troubles de la sensibilité. Plus la dose reçue est importante, plus les symptômes seront graves et précoces. Pour exemple, un érythème secondaire survient pour une dose de 5-6 Gy et une radionécrose cutanéomusculaire pour une dose de 20-30 Gy. Le rayonnement est également à prendre en compte pour prévoir l'effet dermatologique. Ainsi, les rayons X, γ et β de forte énergie sont pénétrants et peuvent conduire à des ostéoradionécroses au-delà de 50 Gy. Les rayons β de faible énergie créent des lésions plus superficielles se limitant souvent à l'épiderme et au derme.

b. Syndrome d'Irradiation Global Aigu

Le Syndrome d'Irradiation Globale Aigu (SIGA) est l'expression clinique rapide d'une irradiation générale supérieure à 1 Gy. Le SIGA évolue en 3 phases : la phase initiale, la phase de latence et la phase d'état. La durée de la phase de latence est inversement proportionnelle à la dose reçue. La phase d'état s'allonge avec la dose reçue [31].

La phase initiale se traduit par l'apparition dans les premières heures post-exposition de symptômes peu spécifiques ressemblant à une gastroentérite : nausées, vomissements, diarrhées, céphalées, asthénie, fièvre... Elle est suivie de la phase de latence qui est asymptomatique et dure entre 5 et 15 jours. Cette phase n'est pas constatée lorsque la dose reçue excède 12 Gy. Vient ensuite la phase d'état de 15 jours à 1 mois, où s'expriment des syndromes relatifs à l'atteinte des cellules les plus radiosensibles [30]. Pour des doses de 1 à 2 Gy, les symptômes sont principalement l'asthénie et les vomissements. Les symptômes hématologiques apparaissent à partir de 2 Gy pour la lymphopénie et à partir de 4 Gy pour les symptômes hémorragiques et infectieux. Les symptômes gastro-intestinaux et pulmonaires apparaissent pour des doses dépassant les 6 Gy et les symptômes neurologiques pour des doses excédant 10 Gy [25].

La dose létale 50, c'est-à-dire la dose à partir de laquelle 50 % des patients décèdent sans traitement est estimée à 4.5 Gy. Elle peut augmenter jusqu'à 8 Gy si des soins tels que la transfusion sanguine et l'injection de facteurs de croissance sont disponibles [27].

c. Effets à long terme

La fibro-atrophie cutanée est connue depuis le début de l'imagerie médicale. C'est l'évolution à long terme la plus grave après une irradiation cutanée. La fibro-atrophie cutanée apparaît après plusieurs phases. La première est la phase de constitution qui peut être asymptomatique ou marquée par une inflammation localisée, elle survient dans les mois suivants l'irradiation. La seconde phase dite « de séquelle organisée » a lieu pendant les premières années post-irradiation. Elle voit le derme et le tissu sous-cutané épaissir tandis que l'épiderme s'amincit et que de nombreuses télangiectasies apparaissent. Enfin la phase de séquelle tardive est celle de la fibro-atrophie sous-cutanée marquée par la rétraction de la peau et qui s'accompagne parfois de compression, d'ulcération, de surinfection ou de retard de cicatrisation.

Concernant les effets à long terme sur l'ensemble de l'organisme, des maladies cancérigènes mais également non cancérigènes ont pu être observées en proportion supérieure chez les survivants des événements à caractère nucléaire du XX^{ème} siècle. Ju et al. retrouvent une prévalence significative de l'hypertension, de l'insuffisance hépatique chronique et de l'hypercholestérolémie chez les survivants coréens d'Hiroshima et Nagasaki [32]. On sait également que la cataracte, les nodules thyroïdiens, l'hyperparathyroïdie et les maladies cardio-vasculaires sont plus fréquentes chez les personnes ayant été irradiées. Quant aux pathologies cancéreuses, les personnes exposées aux rayonnements ionisants présentent un excès de risque de 45 % de développer une leucémie. Le risque absolu augmente également pour les cancers du sein, de l'estomac, du côlon, des poumons, du foie, de la vessie et de la thyroïde [33].

Pour ce qui est des effets d'une exposition à de faibles doses de rayonnements ionisants, on ne peut qu'extrapoler les résultats observés chez les victimes des explosions nucléaires ou des patients ayant suivi une radiothérapie. Les effets des doses inférieures à 100 mSv ne sont pas encore connus avec certitude [34].

D. Les rayonnements au quotidien

1. Irradiation naturelle

L'Homme a toujours été exposé à l'irradiation naturelle aux travers des rayonnements cosmiques, des rayonnements telluriques, du radon et de la radioactivité de l'eau, des aliments et du tabac.

Les rayonnements cosmiques sont issus de l'interaction entre des particules de haute énergie venant de l'espace et les atomes de l'atmosphère. On différencie deux origines distinctes à ces rayons : le rayonnement galactique, des ions de haute énergie, et le rayonnement solaire plutôt protonique. Ces particules de haute énergie vont entrer en collision avec les atomes de l'atmosphère. Celle-ci a un pouvoir de protection des rayons équivalent à un mur d'eau de 10 m d'épaisseur, la majorité des rayons seront stoppés, le reste sera freiné [29]. On constate donc qu'au niveau de la mer l'exposition est en moyenne de 0.26 mSv par an, elle augmente avec l'altitude en doublant tous les 1500 m. Elle dépend également de la latitude et de l'activité solaire. On appelle ceintures de Van Allen les deux zones de l'atmosphère situées à 3 000 km et 22 000 km d'altitude où le champ magnétique terrestre va capturer les protons issus du rayonnement solaire et les empêcher d'atteindre la surface terrestre [35].

La croûte terrestre contient également des radionucléides, principalement l'uranium et le thorium, qui participent à l'exposition naturelle au rayonnement ionisant. En France, elle varie de 0,2 à 0,8 mSv par an, les régions les plus exposées étant les régions granitiques. Ce chiffre étant à mettre en perspective avec d'autres régions du monde où le sol riche en thorium peut exposer à un rayonnement de 15 mSv par an [29].

Le radon est un gaz radioactif issu de la désintégration de l'uranium 238 en radium 226 qui devient lui-même du radon 222. Le radon émet des particules α et se désintègre en produits qui sont également radioactifs [36]. Il migre du sol jusqu'à l'air libre et peut se retrouver piégé dans les bâtiments, ce qui constitue la plus grande partie de l'irradiation présente dans l'air. Le radon 222 tend à se fixer dans les voies respiratoires et est à risque d'engendrer des cancers du poumon.

La radioactivité des eaux et des aliments constitue l'exposition interne d'origine naturelle par ingestion. Elle est due aux radionucléides dissous dans l'eau.

Dans la législation on parle de substances radioactives d'origine naturelle (SRON) pour désigner toute substance qui contient une concentration de potassium 40 supérieure à 10 kiloBecquerel (kBq)/kg ou des concentrations en uranium-238 ou en thorium-232 supérieures à 1 kBq/kg [37].

En France, on estime que la dose naturelle d'irradiation est de 2.9 mSv par an et par habitant (1).

2. Irradiation artificielle

L'irradiation artificielle est d'environ 1.6 mSv par an et par habitant, ce qui porte l'exposition annuelle totale à 4.5 mSv par personne.

Ces 1.6 mSv sont en très grande partie dus à l'exposition médicale qui représente 1.5 mSv, le reste étant les installations nucléaires et les retombés des essais d'armes nucléaires [38].

La population peut être exposée aux travers de trois catégories de pratiques médicales : l'imagerie diagnostique, la médecine nucléaire et la radiothérapie. On entend ici par imagerie diagnostique les techniques d'imagerie utilisant des rayons X, à savoir la radiographie, la fluoroscopie, et la tomodensitométrie. La médecine nucléaire à visée diagnostique pèse également dans la balance, mais la radiothérapie qui délivre de très fortes doses à un nombre limité de patients est négligeable à l'échelle de la population française. On notera ici qu'un scanner abdomino-pelvien délivre une dose de l'ordre de 12 mSv, soit l'équivalent d'un peu plus de 4 ans d'exposition annuelle moyenne.

En ce qui concerne les activités industrielles et militaires, elles induisent environ 0.012 mSv par an. Les applications industrielles sont multiples : jauges et traceurs, stérilisation par irradiation, conservation des aliments, chimie sous rayonnement, détection de masses métalliques dans les aéroports... les installations nucléaires comme les centrales nucléaires sont soumises à des règles strictes et les habitants proches subissent une exposition de 0.01 mSv au maximum par an. Cette part de l'irradiation artificielle est négligeable sur la moyenne de la population française. En revanche, les retombées radioactives de l'accident de Tchernobyl induisent encore aujourd'hui 0.046 mSv d'irradiation par an dans les zones les plus touchées. Quant aux retombées des essais d'armes nucléaires atmosphériques elles comptent pour 0.01 mSv/an [38].

E. Radioprotection

1. Sociétés savantes : ICRU, UNSCEAR, CIPR, AIEA, AEN, IRPA, G7 et Mexico, CE, HERCA, ALARA, ISN, ASN

| Organisme | Année de création | Echelle | Missions |
|--|-------------------------------------|----------|---|
| International Commission on Radiation Units and measurements (ICRU) | 1925 Indépendant depuis 1956 | Mondiale | L'ICRU a pour mission d'approfondir et de développer au niveau international toutes les données concernant la mesure du rayonnement nucléaire. Cette organisation a d'abord harmonisé les pratiques en termes de mesure, d'unité et de terminologie puis elle a publié des recommandations en matière d'usage et de sécurité. Aujourd'hui, elle continue les recherches dans les domaines de la science du rayonnement nucléaire, de la radiothérapie, du diagnostic radiologique, de la médecine nucléaire et de la radioprotection. |
| United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) | 1955 | Mondiale | L'UNSCEAR est mandatée par les Nations Unies pour compiler les données radiobiologiques et épidémiologiques relatives aux effets de l'exposition aux rayonnements ionisants. Ce comité scientifique recoupe et analyse toutes les données existantes sur les effets du rayonnement ionisant sur les êtres vivants. Ces données, considérées comme fiables au niveau international peuvent ensuite être exploitées par d'autres organismes. |

| | | | |
|---|-------------|-----------------|--|
| <p>International Commission on Radiological Protection (CIPR)</p> | <p>1928</p> | <p>Mondiale</p> | <p>Le CIPR a pour mission de mettre à jour les standards de protection des travailleurs, des patients et du grand public vis-à-vis des rayonnements ionisants. Ils publient régulièrement des recommandations en matière d'utilisation des sources de rayonnements ionisants et de protection de l'homme, des animaux et de leur environnement.</p> |
| <p>International Atomic Energy Agency (AIEA en français)</p> | <p>1957</p> | <p>Mondiale</p> | <p>L'AIEA a été créée en tant qu'organisme de « L'atome pour la paix ». Son but est de développer l'utilisation de l'énergie atomique à des fins pacifistes et de façon équitable pour tous les Etats Membres. Le caractère indépendant de cet organisme lui permet également d'exercer un rôle de contrôle auprès des Etats et de vérifier que ceux-ci utilisent l'énergie atomique dans les conditions de sécurité nécessaires et à des fins non militaires.</p> |
| <p>Nuclear Energy Agency (AEN en français)</p> | <p>1958</p> | <p>Mondiale</p> | <p>L'AEN est chargée d'aider les Etats Membres à maintenir et développer leur utilisation de l'énergie nucléaire. Cette aide concerne les domaines du développement scientifique, de l'élaboration du cadre légal ainsi que les aspects environnementaux et économiques. La NEA participe également à promouvoir l'énergie atomique civile comme une énergie durable à faible émission de carbone.</p> |

| | | | |
|---|----------------|----------------------|--|
| Health Physics Society puis International Radiation Protection Association (IRPA) | 1955 puis 1965 | Mondiale | L'IRPA est le regroupement des sociétés savantes nationales dans domaine de la radioprotection. Elle vise à accroître les compétences professionnelles, promouvoir la culture de la radioprotection et encourager les bonnes pratiques en diffusant celles-ci. L'association travaille ainsi sur les effets causés par les rayonnements ionisants et non-ionisants dans les domaines de la médecine, de l'ingénierie, de la technologie et du droit. |
| G7 et Mexico | | Pays du G7 et Mexico | Ces 8 pays travaillent conjointement sur la prévention du risque de malveillance dans les domaines du Nucléaire, du Radiologique, du Bactériologique et du Chimique (NRBC). Ils réfléchissent notamment à la préparation contre le terrorisme nucléaire et radiologique sur le plan de la santé. |
| Communauté Européenne de l'Energie Atomique (CEEa) aujourd'hui Communautés Européennes (CE) | 1957 | Européenne | Issus du regroupement de la Communauté Européenne de l'Energie Atomique, de l'Euratom et de la Communauté Economique Européenne ; les CE promulguent les traités Euratom et sont chargées de mettre en application les recommandations du CIPR. |
| Heads of the European | 2007 | Européenne | Créée récemment, l'HERCA est un organisme ayant pour vocation de développer des mesures |

| | | | |
|--|-------------|-------------------|--|
| <p>Radiological Protection Competent Authorities (HERCA)</p> | | | <p>de radioprotection dans le domaine médical et de travailler en amont de la création de lois concernant la protection de l'environnement. L'association tente également d'harmoniser les pratiques européennes à ce sujet, notamment en les conciliant avec les textes de lois européens et les recommandations internationales.</p> |
| <p>As Low As Reasonably Achievable (ALARA)</p> | | <p>Européenne</p> | <p>L'ALARA est un réseau de personnes et pays européens motivés par l'optimisation de la radioprotection. Ils travaillent au développement et à la propagation de la « culture ALARA », ainsi qu'à l'harmonisation et à la mise en cohérence des réglementations et des pratiques.</p> |
| <p>Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire (IRSN)</p> | <p>2002</p> | <p>Française</p> | <p>L'IRSN est chargée de la recherche en matière de nucléaire en France, elle participe à la formation des professionnels et exerce une activité de veille radiologique. En effet, elle regroupe toutes les informations concernant les sources de rayonnements ionisants du territoire ainsi que celles des personnes et du milieu qui les entoure, à l'exception des sources vouées à la Défense Nationale. C'est l'IRSN qui traite les relevés dosimétriques des travailleurs. Elle peut également apporter son aide à l'ASN dans la gestion des incidents ou accidents liés à des matières radioactives.</p> |

| | | | |
|--|------|-----------|---|
| Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN) | 2006 | Française | L'ASN est issue de la fusion entre la Direction Générale de la Sûreté Nucléaire et de la Radioprotection et les Divisions de la Sûreté Nucléaire et de la Radioprotection. En tant que référent en matière de radioprotection, l'ASN apporte son expertise technique sur les différents projets touchant le nucléaire. Elle est également chargée de contrôler les différentes installations possédant des sources de rayonnement sur le territoire et c'est elle qui fait le lien avec la population française, notamment en cas de situation d'urgence. |
|--|------|-----------|---|

Tableau I. Présentation des différentes autorités savantes en matière de nucléaire

2. Directive EURATOM 2013/59 en application de la CIPR 103 par décret du 4 juin 2018

Les directives Euratom sont des normes relatives à la protection sanitaire contre les dangers résultant de l'exposition aux rayonnements ionisants publiées depuis 1957 et régulièrement mises à jour. Chaque pays membre de l'Union Européenne se doit d'intégrer ces textes successifs à sa législation et à ses pratiques. En ce qui concerne la directive Euratom 2013/59, elle a été transposée dans la Loi française par le décret du 4 juin 2018.

La directive Euratom 2013/59 regroupe et réactualise les cinq directives Euratom fondamentales :

- La directive 89/618/Euratom du 27 novembre 1989 concernant l'information de la population sur les mesures de protection sanitaire applicables et sur le comportement à adopter en cas d'urgence radiologique.
- La directive 90/641/Euratom du 4 décembre 1990, concernant la protection opérationnelle des travailleurs extérieurs exposés à un risque de rayonnements ionisants au cours de leur intervention en zone contrôlée.

- La directive 96/29 Euratom du 13 mai 1996, fixant les normes de base relatives à la protection sanitaire de la population et des travailleurs contre les dangers résultant des rayonnements ionisants.
- La directive 97/43 Euratom du 30 juin 1997, relative à la protection sanitaire des personnes contre les dangers des rayonnements ionisants lors d'expositions à des fins médicales, remplaçant la directive 84/466/Euratom.
- La directive 2003/122/Euratom du 22 décembre 2003 relative au contrôle des sources radioactives scellées de haute activité et des sources orphelines.

Ces directives se basent notamment sur les recommandations de la CIPR parues en 2007, connues sous le nom de CIPR 103. Ces recommandations ont réaffirmé trois principes forts de la radioprotection, à savoir la justification, l'optimisation et la limitation de dose. Ces principes sont définis comme suit :

- le principe de justification : toute décision qui modifie la situation d'exposition aux rayonnements doit être justifiée au regard des avantages qu'elle procure compte tenu du risque ;
- le principe d'optimisation de la protection : la probabilité d'être exposé, le nombre de personnes exposées et le niveau de leurs doses individuelles doivent tous rester aussi faibles qu'il est raisonnablement possible, compte tenu des facteurs économiques et sociétaux et selon le principe ALARA ;
- limitation de dose : la dose totale reçue par un individu, due aux sources réglementées dans les situations d'exposition planifiée, autres que l'exposition médicale de patients, ne doit pas dépasser les limites appropriées indiquées par la Commission. [39]

Par ailleurs, la CIPR base ses recommandations sur trois cas d'exposition aux rayonnements ionisants qui sont les expositions planifiées, les expositions d'urgence (incluant les accidents et les actes malveillants) et les expositions existantes qui font notamment référence au rayonnement naturel. Les expositions planifiées s'accompagnent d'un sous-type d'exposition qui est l'exposition potentielle et concerne les situations qui s'écartent du fonctionnement normal. Tout doit être mis en œuvre pour prévoir et éviter ces expositions potentielles. Les changements notables de la CIPR 103 concernent les facteurs de pondération pour les rayonnements et pour les tissus qui sont utilisés dans le calcul des doses efficaces et équivalentes et qui ont été actualisés. Dans la directive Euratom 2013/59, cela se traduit par une limite sur 12 mois glissants de dose efficace de 20 millisieverts (mSv), contre 100 mSv sur cinq années

consécutives précédemment. De plus, la limite de dose équivalente sur 12 mois consécutifs pour le cristallin passe de 150 mSv à 20 mSv par an ou 100 mSv sur 5 ans avec un maximum de 50 mSv sur une année, et à 15 mSv par an pour les apprentis de 16 à 18 ans (contre 50 mSv par an précédemment).

Limites d'exposition sur un an consécutif

| | Catégorie A | Catégorie B et <u>jeunes travailleurs</u> | Population générale |
|---|---|--|----------------------------|
| Corps entier (dose efficace) | 20 mSv | 6 mSv | 1 mSv |
| Peau (dose équivalente sur tout cm ²) | 500 mSv | 150 mSv | 50 mSv |
| Cristallin (dose équivalente) | 50 mSv (20 mSv à partir de juillet 2023)* | 15 mSv | 15 mSv |
| Main, poignet, pied, cheville (dose équivalente) | 500 mSv | 150 mSv | non existante |

* Par disposition transitoire, la limite est fixée à 50 mSv sur douze mois consécutifs jusqu'au 1^{er} juillet 2023 et 100 mSv sur la période comprise entre le 1^{er} juillet 2018 et le 1^{er} juillet 2023.

[40]

Tableau II. Limites d'exposition sur 12 mois glissants selon les catégories professionnelles

On notera également que la CIPR 103 modernise le calcul des doses provenant de sources externes et internes en remplaçant l'utilisation de modèles mathématiques par des « fantômes numériques » représentant le corps humain. La dernière grande nouveauté concerne la protection de l'environnement. Jusqu'alors on considérait que les normes nécessaires à protéger la population étaient suffisantes pour la protection de l'environnement. Pour aller plus loin, le texte propose d'utiliser des animaux et des plantes de référence pour évaluer plus précisément les doses reçues.

La directive Euratom 2013/59 consacre un chapitre entier aux expositions à des fins médicales. On rappelle que les limites de doses ne s'appliquent pas aux expositions à des fins médicales mais que les expositions doivent suivre le principe ALARA (*as low as reasonably achievable* – aussi bas que raisonnablement faisable). Exception est faite « des personnes participant au soutien et au réconfort des patients et des volontaires participant à des recherches à des fins médicales ou biomédicales ».

F. Radiocontaminants majeurs

1. ^{241}Am / ^{137}Cs / ^{60}Co / ^{131}I / ^{239}Pu / ^3H / ^{235}U et ^{238}U

Dans son *Guide national d'intervention médicale en cas d'évènement nucléaire ou radiologique*, l'ASN établit une liste des radiocontaminants internes et de leurs traitements. Sept radioéléments sont définis comme étant particulièrement dangereux du fait de leur radiotoxicité et de leur fréquence. Ce sont ces radioéléments que nous allons présenter ici [41].

L'américium 241 (^{241}Am) est issu de la désintégration du plutonium 241, sa période radioactive est de 432 ans. Il n'existe pas à l'état naturel, sa présence dans l'environnement est dû en grande partie aux essais d'armes nucléaires et à leurs retombées atmosphériques. C'est également un déchet des centrales nucléaires qui peut se disperser dans l'environnement au moment du retraitement des combustibles irradiés. L' ^{241}Am trouve son usage industriel dans les jauges de niveau, les détecteurs incendie et les stimulateurs cardiaques notamment. C'est l'inhalation et l'ingestion de cet isotope qui représente le plus grand danger pour la santé humaine.

Le césium 137 (^{137}Cs) a une période radioactive de 30 ans. Son existence dans l'environnement trouve son origine dans les essais nucléaires et les déchets des centrales nucléaires. C'est aussi la principale conséquence des accidents nucléaires car il reste longtemps dans l'environnement (tourbes, sous-bois et humus notamment), ce qui engendre un risque de contamination externe et d'irradiation. Il est à noter que l'accident de Tchernobyl a exposé l'Est de la France à des concentrations de ^{137}Cs allant de 3560 à 6000 Bq/m². Le ^{137}Cs a été beaucoup utilisé comme traceur des masses d'eaux car c'est un élément soluble et facile à mesurer. Il est également utilisé en curiethérapie et pour l'irradiation des produits sanguins.

Le cobalt 60 (^{60}Co) possède une période de 5.27 ans. Isotope créé de façon artificielle, il est présent sous forme liquide dans les rejets des centrales nucléaires. Les sources de ^{60}Co sont utilisées en radiothérapie mais aussi dans l'industrie pour la stérilisation du matériel et l'ionisation des aliments. Le ^{60}Co peut s'avérer toxique pour les reins et les systèmes nerveux, cardio-vasculaire et gastro-intestinal. Son inhalation fait courir le risque de fibrose pulmonaire.

L'iode 131 (^{131}I) dérive de la fission de l'uranium ou du plutonium, il a une période radioactive de 8,04 jours. Cet isotope existe à l'état naturel mais on le retrouve surtout dans les réacteurs nucléaires

où il est présent en grande quantité. Du fait de sa période courte, on le retrouve peu dans le processus de retraitement des déchets nucléaires. L' ^{131}I est surtout utilisé en pour l'exploration fonctionnelle et le traitement des cancers de la thyroïde. Il est considéré comme hautement radiotoxique du fait de sa dangerosité pour la thyroïde et de sa bonne dispersion dans l'organisme via les hormones endocriniennes.

Le plutonium 239 (^{239}Pu) est l'isotope du plutonium qui a la demi-vie la plus longue : 24 130 ans. On le retrouve sur Terre du fait des essais nucléaires atmosphériques et marins, des accidents de satellite ou des pertes de missiles nucléaires. Les usines de production de matériel nucléaire ou les usines de retraitement de combustibles usés sont également émettrices de plutonium sous forme liquide principalement.

Le tritium (^3H) est l'isotope radioactif de l'hydrogène, sa période radioactive est de 12,3 ans. Il existe naturellement sous forme aqueuse dans « l'eau super-lourde », sous forme gazeuse par action du rayonnement cosmique sur l'atmosphère et sous forme organique par incorporation à des composés organiques. On pouvait le retrouver dans l'environnement du fait des tirs expérimentaux atmosphériques d'armes nucléaires dont il est un composant essentiel. De nos jours il est relevé principalement dans les rejets des centrales nucléaires et les usines de retraitement des combustibles. Il est notamment utilisé dans la fabrication de peintures luminescentes ou dans les tests d'étanchéité des cavités de stockage souterrain. Contrairement aux autres isotopes cités, sa radiotoxicité est faible. Le risque principal est la contamination interne car le tritium sera complètement absorbé et le passage sanguin sera total.

L'uranium 235 (^{235}U) et 238 (^{238}U) sont les isotopes de l'uranium les plus abondants sur Terre, leurs périodes radioactives se comptent respectivement en centaine de millions et en milliards d'années. Naturellement présent dans l'environnement, les quantités d'uranium augmentent du fait de son utilisation comme combustible des centrales nucléaires et comme composé des bombes nucléaires. Mais il est également un des déchets de la combustion du charbon et on le retrouve dans les engrais phosphatés utilisés pour l'agriculture. Sa dangerosité vient principalement de sa toxicité chimique car il est néphrotoxique.

2. Traitements des radiocontaminants

Le traitement de la contamination externe repose sur un même protocole quel que soit le radionucléide incriminé. Il s'agit d'abord de déshabiller précautionneusement le patient en roulant les vêtements de l'intérieur vers l'extérieur afin de ne pas contaminer la peau saine. La suite de la procédure

consiste en un lavage soigneux à l'eau et au savon liquide. Les yeux seront abondamment rincés à l'eau. Les plaies seront lavées avec une solution d'Acide diéthylène triamine penta acétique (DTPA) à 25 %.

La prise en charge de la contamination interne va reposer sur 4 principes : éliminer les radionucléides présents dans les systèmes non-sanguins, limiter leur accumulation, limiter leur transfert vers le système sanguin et accélérer l'élimination globale des radionucléides.

L'élimination des radionucléides présents dans le système digestif passera par l'emploi de laxatifs qui vont diminuer l'absorption des substances contaminantes. On citera les laxatifs stimulants avec le Dulcolax à la posologie d'un comprimé matin et soir, ou les laxatifs osmotiques comme le Polyéthylèneglycol en une prise de 3 à 4 l. Le Sulfate de Magnésium en 3 à 5 ampoules de 20 ml par jour permet une augmentation de la synthèse digestive également intéressante. En ce qui concerne le système respiratoire, l'efficacité de l'utilisation de mucolytiques n'a pas été démontrée.

L'accumulation des radionucléides dans les organes cibles dépend de la rapidité de l'incorporation qui est fonction des propriétés chimiques de chaque élément. On empêche l'accumulation du radionucléide en saturant l'organe cible. Pour la thyroïde par exemple la saturation est obtenue avec la prise d'iode stable 1 à 2 h avant l'exposition. Chaque comprimé contient 65 mg d'iode stable, la posologie pour les adultes est de deux comprimés en une prise per os. Dans la population civile, la prise de comprimés d'iode se fait sur ordre du Préfet.

Le passage vers le secteur plasmatique va dépendre de la transférabilité du radioélément. On parle de substance transférable pour les radionucléides qui sont des analogues chimiques d'éléments naturellement présente dans l'organisme (comme le ^{137}Cs qui est l'analogue du potassium) ou des analogues chimiques d'éléments normalement absorbés par l'organisme (comme l' ^{131}I). Les radionucléides non transférables ne possèdent pas d'analogues dans le corps humain, c'est le cas des métaux lourds. La limitation du transfert vers le sang dépend de la localisation initiale du radionucléide. Pour la peau c'est la décontamination qui constitue la meilleure protection. Pour le système digestif, la protection de la muqueuse peut être obtenue par l'utilisation de Phosphalugel. Il n'existe pas de solution en ce qui concerne le système respiratoire. Dans le cas particulier de la contamination au ^{137}Cs , on peut utiliser le Bleu de Prusse qui, en se complexant avec le césium, va devenir non transférable et être éliminé dans les selles. La posologie est de 3 g de Bleu de Prusse trois fois par jour.

Enfin, l'accélération de l'élimination urinaire et digestive peut être obtenue par différentes substances. L'acide diéthylène triamine pentaacétique (CaDTPA) est un chélateur du plutonium. En le complexant il facilite son élimination urinaire. 95 % du plutonium sera éliminé en 6 h et la totalité en moins de 12 h. La posologie est de 0.5 g/j de CaDTPA en intra-veineux dilué dans du sérum physiologique. Le CaDTPA est aussi efficace sur l'²⁴¹Am, le fer, le ⁶⁰Co et le curium. Le bicarbonate de sodium associé à l'Acétazolamide va permettre la sécrétion de l'uranium par le rein. La posologie est de 250 mL de bicarbonate de sodium 1.4 % associé à 500 mg d'Acétazolamide par jour. Enfin, on peut utiliser la dilution isotopique qui consiste à administrer l'isotope stable ou l'analogue chimique du radiocontaminant pour diminuer la concentration d'éléments radioactifs. Pour le ⁶⁰Co on utilisera le gluconate de cobalt et pour l'³H on fera boire 3 à 4 l d'eau par jour.

En ce qui concerne l'irradiation, la prise en charge dépendra de l'étendue de la zone concernée.

Le traitement de l'irradiation localisée va reposer sur la prise en charge de la douleur qui est complexe car les brûlures radio-induites sont résistantes aux morphiniques. Il faudra par ailleurs procéder à l'excision précoce des tissus nécrotiques et éventuellement à la mise en place de lambeau musculaire ou d'autogreffe de peau. On administrera également des cellules souches mésenchymateuses de manière répétée.

Le SIGA sera pris en charge en unité de soins intensifs hématologiques, le patient pourra bénéficier d'injection de cytokines (G-CSF) et d'érythropoïétine pour stimuler la moelle. L'évaluation de la récupération médullaire se fera au bout 3 semaines. En cas d'aplasie médullaire, une greffe avec donneur allogénique peut être tentée. Cependant les données issues du traitement des victimes de Tchernobyl ne montrent pas d'influence sur la survie.

G. Scénarii des expositions accidentelles en médecine générale

1. Incident de centrale nucléaire productrice d'énergie (CNPE)

Selon l'IRSN, les accidents à caractère nucléaires sont à 41 % attribués aux accidents ayant lieux dans le cadre de l'industrie. En ce qui concerne le nucléaire civil, seul 11 % des accidents répertoriés sont imputables à ce secteur [42].

En effet, le risque radiologique existe partout dans l'industrie. On le retrouve dans l'amélioration de la qualité des matières par irradiation, dans les procédés de maintenance avec les traceurs ou encore le contrôle de qualité par scintigraphie [43]. La plupart des incidents surviennent secondairement à des erreurs humaines lors du mésusage d'une installation ou du non-respect des mesures de sécurité. Les accidents de criticité, soient la mise en présence d'une quantité suffisante de matière fissile et d'un environnement adéquat occasionnant une explosion et une émission radioactive, sont de moins en moins nombreux avec l'amélioration constante des dispositifs de sécurité.

En ce qui concerne les CNPE, l'éventualité d'un incident serait dû au vieillissement de l'installation qui engendrerait son mauvais fonctionnement ou à une erreur dans la procédure de fonctionnement normal. Le premier cas de figure est prévenu par le contrôle annuel des CNPE par l'ASN. Le second par la mise en place de procédures standardisées.

Si un incident devait survenir, chaque CNPE doit mettre en place un plan d'urgence interne qui mobilise la centaine de personnels constamment en astreinte sur une centrale nucléaire. Existe également un plan particulier d'intervention sous la direction du Préfet qui va concerner la mise à l'abri des populations, la prise de comprimés d'iode et l'évacuation.

Il est à noter que les comprimés d'iode peuvent être récupérés en pharmacie par les personnes vivant à moins de 20 km d'une CNPE sur présentation d'un justificatif de domicile [44].

2. Exposition médicale

Le risque radiologique secondaire à une exposition médicale est principalement représenté par le mauvais étalonnage ou le mauvais réglage des machines utilisées en radiothérapie. Les patients subissent alors un surdosage pouvant entraîner des lésions superficielles telles que des érythèmes ou des ulcérations, mais également le décès selon la dose reçue et la fragilité préalable des patients.

Malgré les mesures de précautions prises, le dernier évènement connu est survenu en avril 2021 à Avignon. Les accélérateurs de radiothérapie utilisés dans le service font l'objet de contrôle de qualité et d'étalonnages périodiques. Une erreur d'étalonnage du faisceau de photons de l'une des machines a conduit à la délivrance de doses supérieures de 5 % à 6.8 % par rapport aux doses prescrites sur 99 patients. Le service a mis en place le réétalonnage en urgence de l'accélérateur avec double contrôle du réglage ainsi qu'une vérification de tous les autres accélérateurs. Le procédé d'étalonnage des machines a également été revu, ainsi que la formation des différents intervenants. L'ASN a estimé que ces

différentes mesures étaient suffisantes pour prévenir un nouvel incident, ces derniers restant néanmoins toujours possibles [45].

3. Terrorisme

Dans cette partie il ne sera pas traité des armes nucléaires et des bombes sales. En effet, ce type d'évènements mobiliseraient principalement des services d'urgence et de SMUR sur le plan médical plutôt que de la médecine de ville du fait notamment des effets physiques de l'explosion, à savoir le souffle, la chaleur et les impacts des débris. Des scénarios tels que celui-ci sont prévus par la circulaire 800 du 18 février 2011.

a. Attaque d'installation nucléaire civile à évènement initiateur insidieux

Ce cas de figure est celui d'une action malveillante non violente visant à mettre en péril le bon fonctionnement d'une installation nucléaire. Cette action est techniquement difficile de par la conception des installations qui sont séparées en 3 enceintes distinctes disposant chacune de leurs systèmes de sécurité. Les cas de figure les plus probables sont ceux d'une cyber-attaque ou de l'action d'un membre du personnel. Dans les deux cas, les éventuels rejets nucléaires contaminant et irradiant surviendraient de façon progressive, ce qui permettrait de les contrôler plus facilement.

b. Contamination de denrées alimentaires ou de réseau de distribution d'eau

Le cas de figure exposé ici serait celui de la contamination radioactive d'origine accidentelle ou malveillante. Le risque en ciblant les denrées alimentaires ou le réseau de distribution de l'eau serait celui d'un dépassement d'une limite sanitaire par contamination interne pour un grand nombre de personnes. Les quantités de radionucléides ingérées seraient probablement insuffisantes pour provoquer des effets cliniques immédiats, ce qui rendrait la découverte de la contamination difficile. Les médecins généralistes seraient en première lignes face aux éventuels symptômes et face à la panique engendrée par la découverte de la pollution nucléaire. De plus, le retour à des installations conformes pour la distribution de l'eau et des aliments serait fastidieux.

c. Epanchage de produit radiologique

Ce scénario a déjà été employé à diverses reprises par des groupes terroristes mais sans utilisation de radionucléides jusque-là. Le risque serait la contamination des êtres et de l'environnement en contact

avec des radiocontaminants. La démocratisation des drones rend ce cas de figure de plus en plus probable. Cette fois la quantité de radionucléides serait probablement plus conséquente et causerait plus de dégâts chez un nombre moins important de personnes.

d. Source scellée

On entend ici l'abandon d'une source radioactive scellée dans un lieu public occasionnant une irradiation externe globale ou localisée. Selon la dose et le débit de la source, les symptômes pourraient survenir plusieurs heures voire plusieurs jours après l'exposition. Cela rendrait le diagnostic et l'identification des irradiés difficile. En 2014, l'IRSN dénombrait 47 000 sources scellées sur le seul territoire français [46]. Si les vols ou les pertes sont rares dans notre pays, il existe à l'échelle de l'Europe plusieurs sources dites « sources orphelines » qui sont stockées dans des locaux mal ou non identifiés et donc non contrôlés.

H. Spécificités de la Moselle

1. Exposition naturelle

Comme nous l'avons vu plus haut, l'exposition naturelle aux rayonnements ionisants se divise entre les rayonnements cosmiques, le radon et les rayonnements telluriques.

En Moselle, l'exposition au rayonnement cosmique a été mesurée à 318 $\mu\text{Sv}/\text{an}$, ce qui est légèrement supérieur à la moyenne française de 312 $\mu\text{Sv}/\text{an}$. Ce chiffre est à mettre sur le compte de l'altitude moyenne du département de 247 m.

L'exposition au rayonnement tellurique est également plus élevée que la moyenne nationale avec une moyenne française de 0.63 mSv/an, tandis que les mosellans sont annuellement exposés à un rayonnement de 0.89 mSv.

En revanche pour ce qui est de l'exposition au radon, la moyenne mosellane est de 3.1 mSv/an selon les normes éditées par la CIPR 137, alors que la France enregistre une exposition moyenne de 3.54 mSv/an [47]. Ainsi, la plupart des communes de Moselle sont classées catégorie 1 ou 2 de potentiel radon sur 3 catégories existantes. La catégorie 1 représentant les zones dont la composition en uranium du sol est la plus faible et la catégorie 2 « *des formations géologiques présentant des teneurs en uranium faibles*

mais sur lesquelles des facteurs géologiques particuliers peuvent faciliter le transfert du radon vers les bâtiments» [48].

2. Exposition artificielle

Si la Moselle est déjà naturellement exposée aux rayonnements ionisants, c'est surtout par ses sources artificielles d'expositions qu'elle se distingue.

Tout d'abord, la partie sud-est de la Moselle appartient à ce que l'on appelle une zone de rémanence élevée de retombées anciennes. En effet, certaines régions françaises portent encore les stigmates du passage du nuage radioactif de Tchernobyl et des retombés de Césium 137 qui en ont découlé. En 2015, on estimait que les habitants de ces zones où les radionucléides sont encore présents étaient exposés à des doses annuelles moyennes de 37 μ Sv contre 5.4 μ Sv sur le reste du territoire [49].

De plus, si selon le rapport du constat radiologique Nord-Est de 2020 publié par l'IRSN, la Moselle serait exposée au risque radiologique de par ses centres de médecine nucléaire. Outre les accidents ponctuels de réglage des machines dont nous avons parlé précédemment, ces activités rejettent dans les cours d'eau des radionucléides dont les concentrations sont élevées dans le département avec parfois des mesures atypiques comprises entre 50 et 3 900 Bq/kg sec [50].

Enfin, c'est la présence de la centrale productrice d'électricité de Cattenom qui fait de la Moselle une région particulière sur le plan du niveau d'exposition au risque radiologique. Sur les 96 départements que compte la France métropolitaine, 18 sont concernés par la présence d'une CNPE [51]. Cattenom se classe septième à l'échelle mondiale en terme de puissance et deuxième en France pour la production d'électricité [52]. Deux périmètres sont importants en matière de sécurité autour d'une CNPE : le périmètre d'évacuation immédiate de 5 km et le périmètre de mise en action du plan particulier d'intervention de 20 km. Il est intéressant de noter que Thionville, et donc l'hôpital Bel Air, se trouvent inclus dans le périmètre d'évacuation immédiate en cas d'accident mais également dans le périmètre de mise à l'abri de 2 km en cas d'accident à cinétique rapide. Par ailleurs, sur les 725 communes que compte la Moselle, 112 sont situées à 20 km ou moins de la centrale. Ce qui signifie que 15.4 % des communes sont concernées par le plan particulier d'intervention. Ce plan établi au niveau préfectoral permet notamment l'accès gratuit à des comprimés d'iode stabilisé aux habitants de ce périmètre [51].

Régulièrement contrôlée, la centrale Cattenom a signalé 10 évènements significatifs pour la sûreté en 2021. Cette même année, l'ASN considérait que « *la performance de la centrale de Cattenom en*

matière de sûreté rejoint l'appréciation générale que l'ASN porte sur les centrales nucléaires d'EDF à la suite de l'amélioration observée en 2020. Comme les années précédentes, la performance en matière de protection de l'environnement et de radioprotection se situe dans la moyenne, mais des progrès restent attendus» [53].

Matériels et Méthodes

A. Etude

Il s'agissait d'une étude observationnelle, descriptive, transversale. L'objectif primaire était d'évaluer le niveau de sensibilisation au risque radiologique des praticiens généralistes de Moselle. L'objectif secondaire était de rechercher un éventuel lien entre le niveau de sensibilisation et l'éloignement par rapport à la centrale nucléaire de Cattenom.

B. Questionnaire

1. Elaboration du questionnaire

Le questionnaire (Annexe 1) a été divisé en cinq parties. La première partie visait à collecter des renseignements épidémiologiques ; à savoir le genre, le délai depuis la fin de l'internat, le mode d'exercice, si la personne exerçait seule ou en groupe et enfin la distance du lieu d'exercice par rapport à la centrale nucléaire de Cattenom. Les parties 2, 3 et 4 concernaient les grands axes du risque radiologique d'origine artificielle : le risque au travail, l'imagerie médicale et les situations d'urgence. La dernière partie traitait des axes d'amélioration en matière de formation.

Les questions ont été posées sous forme de questionnaire à choix simple ou multiples, à l'exception de la partie 2 qui comportait des questions ouvertes.

Le questionnaire a ensuite été généré et mis en ligne par le biais d'un outil d'enquête gratuit sur internet.

2. Diffusion du questionnaire

La diffusion du questionnaire a été faite par le biais de l'Ordre des Médecins de Moselle. Plusieurs courriels et appels téléphoniques ont été échangés avec eux durant le mois de septembre 2021 afin d'obtenir leur accord et de leur transmettre le lien vers le questionnaire. Ce lien a été diffusé dans un courriel de l'Ordre des Médecins de Moselle du 3 avril 2022 aux médecins généralistes inscrits sur la liste de diffusion de l'Ordre, soit 1893 praticiens. Les réponses au questionnaire ont été reçues entre le 3 avril 2022 et le 11 juillet 2022.

C. Population

La population cible était les médecins généralistes exerçant en Moselle. Notre critère d'inclusion était d'être médecin généraliste et d'être inscrit à l'Ordre des Médecins de Moselle. Le recrutement a été fait par la réponse ou non au questionnaire envoyé. Le mode d'envoi des questionnaires a exclu, de fait, les médecins militaires exerçant dans le département et statutairement non-inscrits à l'Ordre des Médecins.

D. Analyse statistique

Les réponses issues des questions ouvertes ont été regroupées par classes. Toutes les données ont été incrémentées dans le logiciel EpiInfo v6. Ce logiciel a permis d'obtenir les pourcentages de réponses à chaque question. Les données de la partie épidémiologiques ont ensuite été croisées avec les réponses relatives au risque radiologique par un test du KHI2. Le test Anova a été utilisé pour la moyenne renommée « dose journalière » dans EpiInfo et correspondant à l'équivalent dose journalière d'un scanner abdominopelvien. Le test du KHI2 a également été utilisé pour croiser les données sur la distance entre le lieu d'exercice et la centrale nucléaire de Cattenom et les réponses des parties 2, 3 et 4.

Résultats

A. Données épidémiologiques

1. Sexe

Parmi les 52 médecins ayant répondu au questionnaire, 28 étaient des hommes et 24 des femmes.

2. Fin de l'internat

A la question « Quand avez-vous fini votre internat », nous avons retrouvé les réponses suivantes : 34.6 % « il y a moins de 10 ans », 23.1 % « entre 10 et 20 ans », 19.2 % « entre 20 et 30 ans », 17.3 % « entre 30 et 40 ans » et 5.8 % « il y a plus de 40 ans » (*Figure 1*).

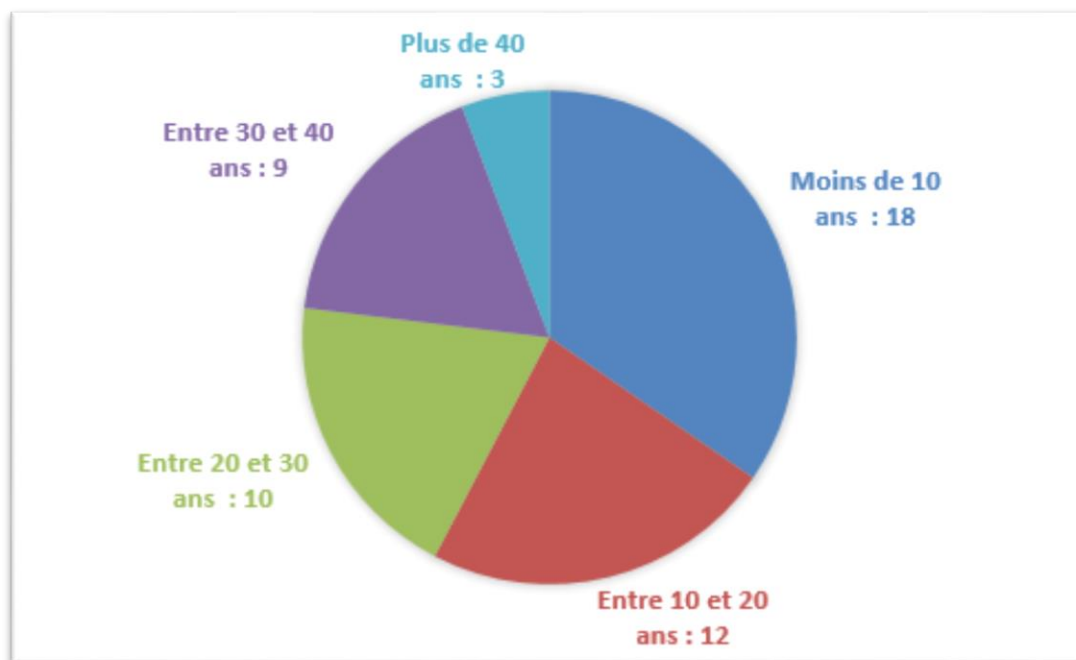


Figure 1. Répartition des médecins selon le délai depuis la fin de leur internat

3. Mode d'exercice

Le questionnaire interrogeait sur le mode d'exercice des participants. La majorité, soit 63.5 %, exerçaient en cabinet médical, 19.2 % à l'hôpital, 15.4% en maison de santé et 1.9 % en centre de santé au travail.

4. Exercice seul ou à plusieurs

76.9 % des praticiens exerçaient en groupe. 17.3 % exerçaient seuls et 5.8 % avaient une activité mixte.

5. Distance du lieu d'exercice principal avec la centrale nucléaire de Cattenom

7.7 % des médecins exerçaient à « moins de 10 km » de la centrale nucléaire de Cattenom, 7.7 % « entre 10 et 30 km », 40.4 % « entre 30 et 50 km », 32.7 % « entre 50 et 100 km » et 11.5 % « entre 100 et 150 km » (*Figure 2*).



Figure 2. Répartition des médecins selon la distance séparant leur lieu d'exercice principal de la CNPE de Cattenom

B. Exposition au travail

1. Prise en compte du risque radiologique

A cette question, 21.2 % des personnes répondaient ne jamais le prendre en compte, 34.6 % « rarement », 23.1 % « parfois », 13.5 % « souvent » et 7.7 % « toujours » (*Figure 3*).

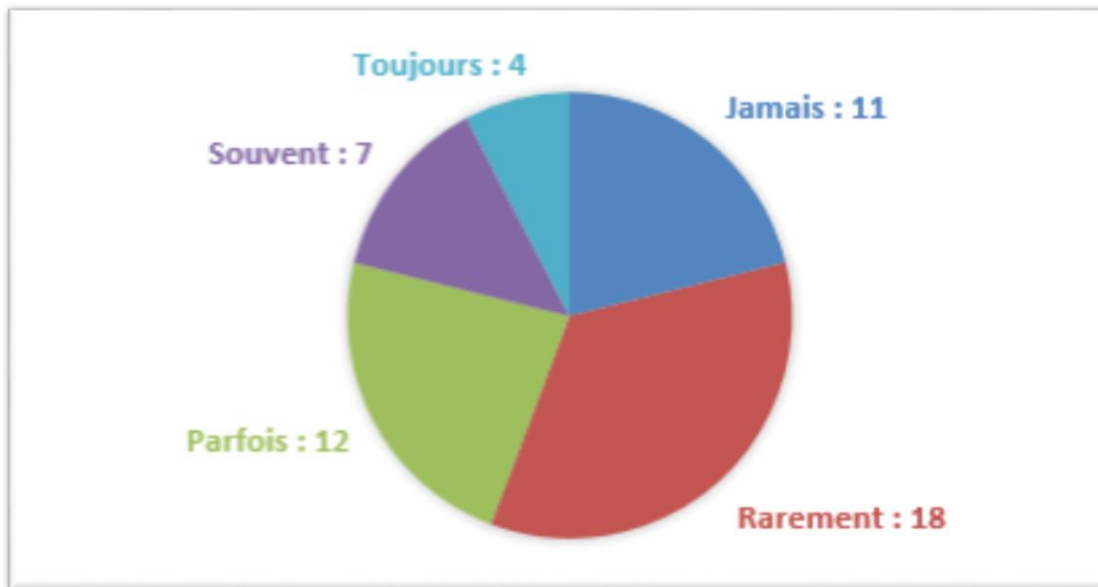


Figure 3. Proportions de médecins déclarant prendre en compte le risque radiologique dans leur pratique

2. Résultats de surveillance d'exposition radiologique

La majorité des interrogés (84.6 %) ayant répondu au questionnaire n'avaient jamais été confrontés à des résultats de surveillance d'exposition radiologique contre 15.4 % qui l'avaient déjà été.

3. Examens complémentaires

Lorsqu'ils étaient questionnés sur la prescription d'un examen complémentaire en pensant à un risque radiologique, 48.1 % des praticiens disaient n'avoir jamais été dans cette situation. Concernant les autres participants, 15.4 % avaient « rarement » prescrit un examen complémentaire dans cet état d'esprit, 17.3 % « parfois », 15.4 % « souvent » et 3.8 % « toujours » (*Figure 4*). Parmi les personnes comptabilisées comme ayant déjà réalisé ces prescriptions, 1 réponse nulle avait été enregistrée. Pour les autres, 85.2% avaient prescrit des examens d'imagerie dont 48.1 % qui avaient prescrit des scanners et 14.8 % avaient prescrit des examens biologiques (*Figure 5*).

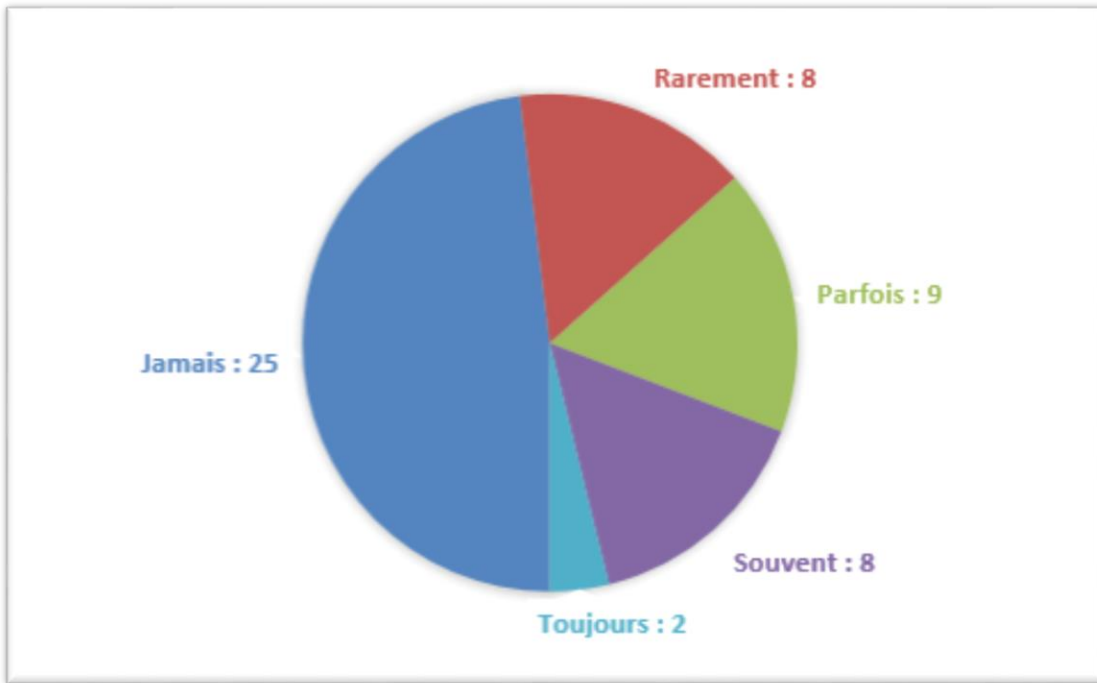


Figure 4. Proportions de médecins déclarant avoir déjà prescrit un examen complémentaire en pensant à un risque radiologique

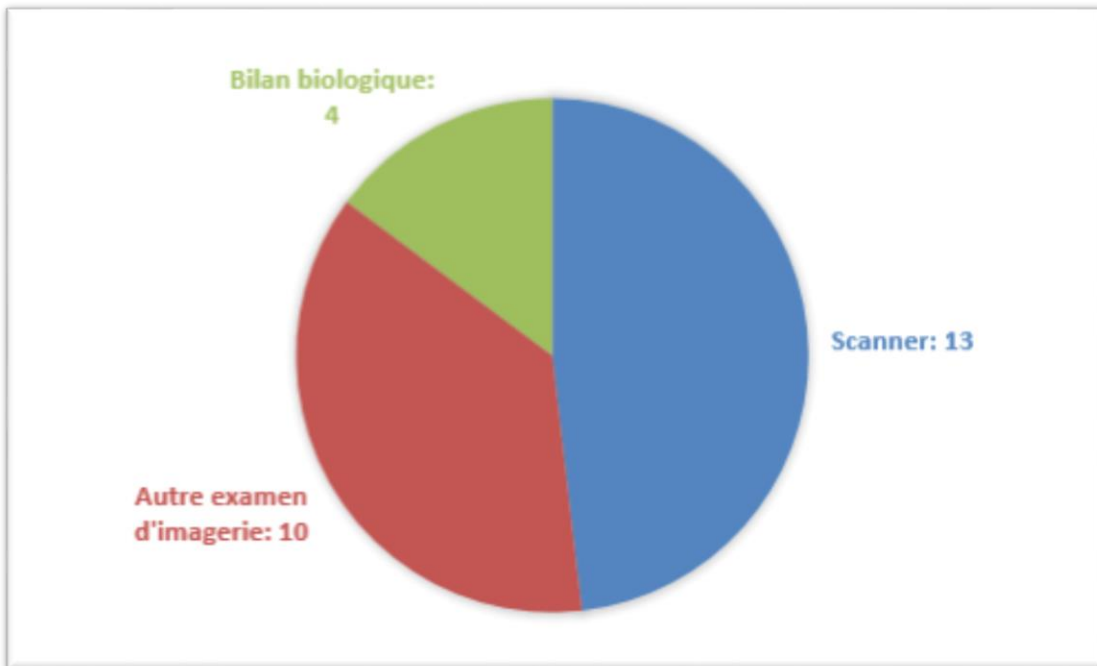


Figure 5. Types d'examens complémentaires prescrits

4. Diagnostic évoqué

Les 21 médecins qui se sont prononcés sur les diagnostics qui motivaient ces examens d'imagerie évoquaient des cancers solides (45 %), des pathologies autres que tumorales (30 %) et des hémopathies (25 %). 1 participant a envoyé une réponse nulle.

C. Examens d'imagerie

1. Modification de prescription de scanner

7.3 % personnes interrogées n'ont jamais modifié leur prescription de scanner du fait du risque lié à l'exposition au rayonnement ionisant. Mais 30.8 % répondaient le faire « rarement », 38.5 % « parfois », 11.5 % « souvent » et 1.9 % « toujours » (*Figure 6*).

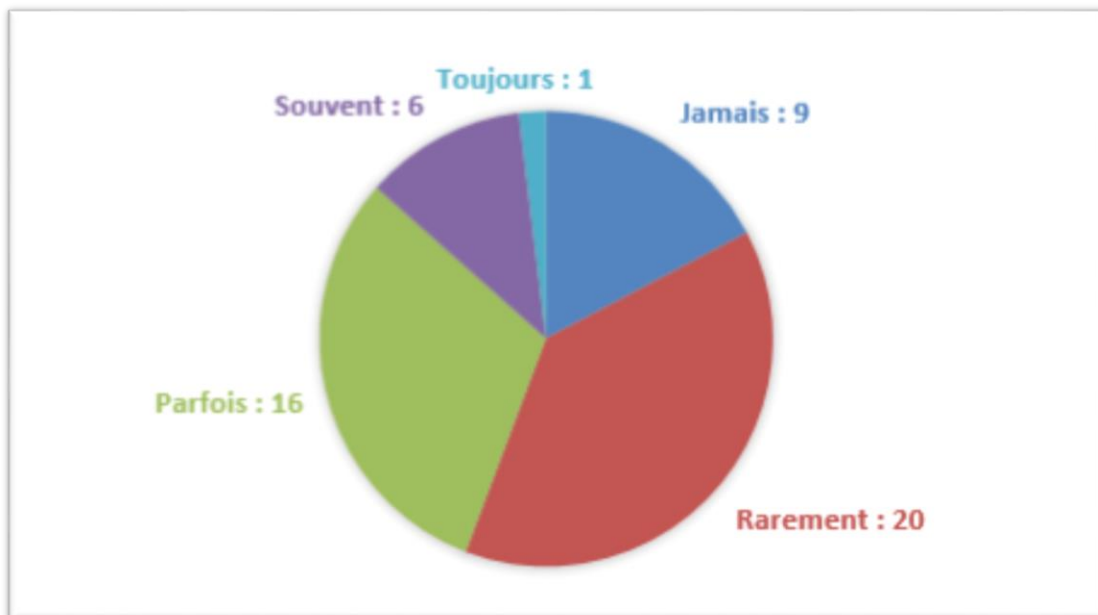


Figure 6. Proportions de médecins déclarant avoir déjà modifié la prescription d'un examen d'imagerie à cause du risque lié à l'exposition aux rayonnements ionisants

2. Alternative choisie

Lorsqu'ils choisissaient une alternative à un examen irradiant, les deux-tiers (28 praticiens) prescrivait un autre examen d'imagerie, 8 une surveillance clinique et 6 choisissaient de reporter l'examen.

3. Interrogation sur la dose de rayonnement ionisant reçue par un patient lors d'un examen d'imagerie

Parmi les réponses enregistrées, 11.5 % des médecins déclaraient n'avoir jamais réfléchi à la dose reçue par leurs patients lors d'examens d'imagerie, 25 % y avaient rarement, 40.4 % parfois réfléchi, 19.2 % souvent et 3.8 % y pensaient toujours (*Figure 7*).

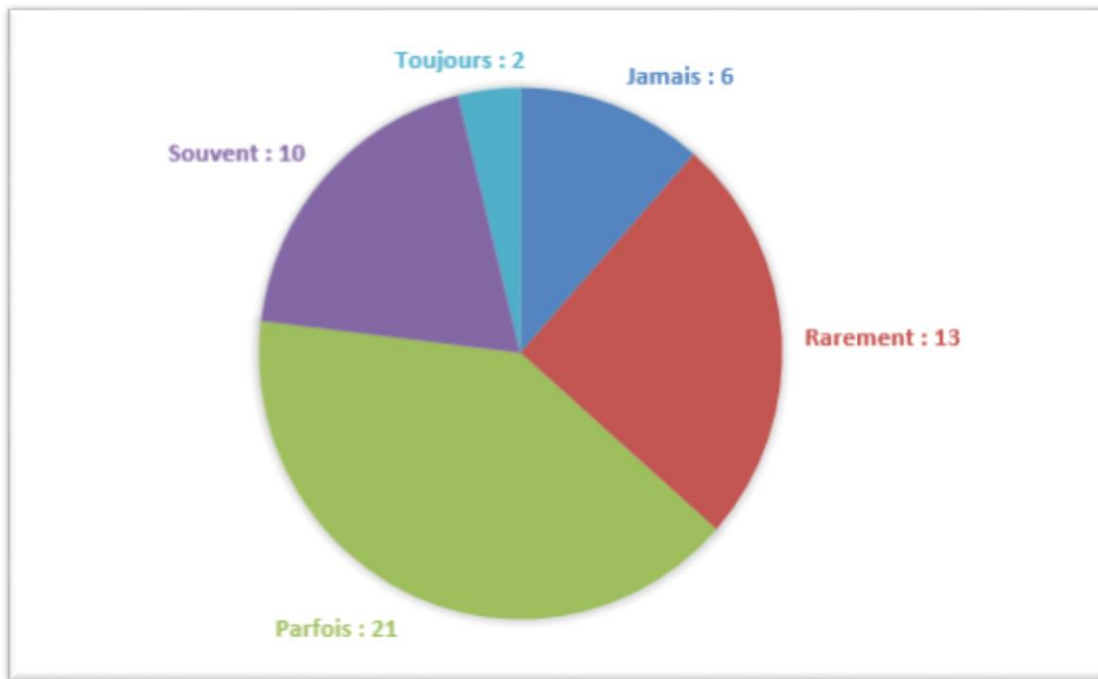


Figure 7. Proportions de médecins déclarant avoir déjà été amené(e) à vous interroger sur la dose de rayonnement ionisant reçue par votre patient lors d'un examen d'imagerie

4. Equivalent dose journalière d'exposition d'un scanner abdominopelvien

30.8 % des participants pensaient qu'un scanner abdominopelvien équivalait à « 15 jours », 30.8 % à « 150 jours », 21.2 % à « 365 jours » et 17.3 % à « 1500 jours ».

D. Situations d'urgence

1. Evoquer un Syndrome Aigu d'Irradiation en phase initiale

38.5 % des personnes déclaraient ne jamais penser au Syndrome Aigu d'Irradiation devant des symptômes compatibles. 28.8 % y pensaient rarement, 17.3 % parfois, 3.8 % souvent et 11.5 % toujours (*Figure 8*).

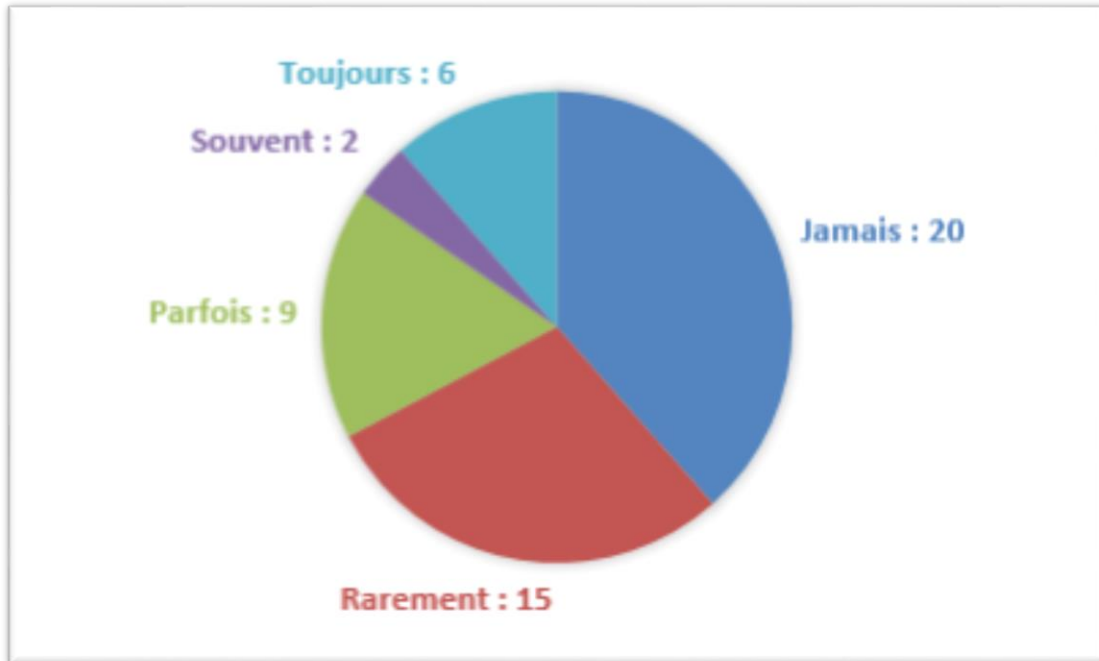


Figure 8. Proportions de médecins déclarant penser à une cause radiologique devant des symptômes compatibles avec un SAI

2. Capacité à conseiller sur la prise de comprimés d'iode

80.8 % des médecins interrogés ne s'estimaient pas en mesure de conseiller les patients sur la prise des comprimés d'iode en cas d'incident sur une Centrale Nucléaire de Production d'Electricité. A contrario, 19.2 % ont répondu positivement à cette question.

3. Vers qui se tourner en cas de suspicion d'exposition radiologique

Parmi les propositions qui leur étaient faites, 44.2 % des praticiens répondaient se tourner vers l'IRSN en cas de suspicion de risque pour la santé d'un patient consécutif à une exposition radiologique.

Les deux autres réponses les plus fréquentes étaient le CRRA 15 et l'ARS (34.6%). Les autres réponses à cette question étaient détaillées dans le *Tableau III* :

| Propositions | Nombre de réponses |
|--|--------------------|
| Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) | 23 |
| Centre de Réception et de Régulation des Appels (CRRA) 15 | 18 |
| Agence Régionale de Santé (ARS) | 18 |
| Médecin du travail | 16 |
| Médecin nucléaire | 10 |
| Radiologue | 6 |
| Médecin interniste | 4 |
| Médecin EDF | 4 |
| Ne sait pas | 3 |
| Centre de Traitement de l'Alerte des sapeurs-pompiers (CTA) 18 | 1 |
| Commissariat à l'Energie Atomique (CEA) | 1 |
| Médecin militaire | 1 |

Tableau II. Personnes ressources citées en cas de suspicion de risque consécutif à l'exposition radiologique d'un patient

4. Recevoir des messages d'alerte de la CNPE Cattenom

92.3 % des praticiens jugeraient utiles de recevoir des messages d'alerte de la CNPE Cattenom, contre 7,7 % qui n'en voient pas l'utilité.

E. Pistes d'amélioration

1. Souhait d'être informé sur le risque radiologique

90.4 % des participants disaient souhaiter recevoir plus d'information sur le risque radiologique contre 9.6 % qui n'en souhaitaient pas.

2. Média d'information souhaité

Les moyens d'information « mails » et « séances de formation continue » ont été choisis par 38.4 % des personnes interrogées. Les autres choix du moyen d'information souhaité sont décrits dans le *Tableau IV* :

| Propositions | Nombre de réponses |
|-------------------------------|--------------------|
| Séances de formation continue | 20 |
| Mails | 20 |
| Site internet | 17 |
| Revue médicale | 17 |
| Flyers | 7 |
| Affiches | 6 |
| Aucun de ces moyens | 1 |

Tableau III. Formats d'informations sur le risque radiologique

F. Objectif secondaire

Pour pouvoir procéder à l'analyse statistique, nous avons regroupé les distances en 3 catégories : « de 0 à 30 km », « de 30 à 50 km » et « de 50 à 150 km ». A l'aide d'un test du Khi 2, les données épidémiologiques et les réponses sur les différents aspects du risque radiologique ont été croisées avec les données sur la distance entre le lieu de travail et la CNPE de Cattenom.

1. Données épidémiologiques

Aucune différence significative n'a été trouvée entre le délai de fin de l'internat ($p = 0.13$), le mode d'exercice ($p = 0.07$), la collégialité de l'exercice ($p = 0.35$) et la distance entre le principal lieu d'exercice et la CNPE de Cattenom (*Tableau V*).

| | 0 à 30 km | 30 à 50 km | 50 à 150 km | Total | Test du Khi 2 |
|----------------------------|-----------|------------|-------------|-------|---------------|
| Fin de l'internat | | | | | |
| < 10 ans | 3 | 5 | 10 | 18 | p = 0.13 |
| 10 à 30 ans | 1 | 12 | 9 | 22 | |
| > 30 ans | 4 | 4 | 4 | 12 | |
| Total | 8 | 21 | 23 | 52 | |
| Mode d'exercice | | | | | |
| Cabinet | 6 | 8 | 16 | 30 | p = 0.07 |
| Maison de santé | 2 | 3 | 4 | 9 | |
| Hôpital | 0 | 6 | 3 | 9 | |
| Autre | 0 | 4 | 0 | 4 | |
| Total | 8 | 21 | 23 | 52 | |
| Exercice seul ou en groupe | | | | | |
| Seul | 1 | 2 | 6 | 9 | p = 0.35 |
| Groupe | 6 | 17 | 17 | 40 | |
| Mixte | 1.1 | 2 | 0 | 3 | |
| Total | 8 | 21 | 23 | 52 | |

Tableau IV. Analyse croisée entre données épidémiologiques et distance à la CNPE de Cattenom

2. Exposition au travail

Notre étude n'a pas montré de différence significative avec $p = 0.62$ pour la prise en compte du risque radiologique en consultation, $p = 0.07$ pour la rencontre avec des résultats de surveillance d'exposition radiologique, $p = 0.29$ pour la prescription d'examens complémentaires, $p = 0.38$ pour le type d'examens complémentaires prescrits et $p = 0.34$ pour le diagnostic supposé (*Tableau VI*).

| | 0 à 30 km | 30 à 50 km | 50 à 150 km | Total | Test du Khi 2 |
|--|-----------|------------|-------------|-------|---------------|
| Prise en compte du risque radiologique en consultation | | | | | |
| Jamais | 2 | 4 | 5 | 21 | p = 0.62 |
| Rarement | 2 | 8 | 8 | 18 | |
| Parfois | 1 | 3 | 8 | 12 | |
| Souvent | 2 | 4 | 1 | 7 | |
| Toujours | 1 | 2 | 1 | 4 | |
| Total | 8 | 21 | 23 | 52 | |
| Confrontation à des résultats de surveillance d'exposition radiologique | | | | | |
| Non | 5 | 17 | 22 | 44 | p = 0.07 |
| Oui | 3 | 4 | 1 | 8 | |
| Total | 8 | 21 | 23 | 52 | |
| Prescription d'examen complémentaire en pensant à un risque radiologique | | | | | |
| Jamais | 5 | 8 | 12 | 25 | p = 0.29 |
| Rarement | 2 | 2 | 4 | 8 | |
| Parfois | 0 | 6 | 3 | 9 | |
| Souvent | 0 | 5 | 3 | 8 | |
| Toujours | 1 | 0 | 1 | 2 | |
| Total | 8 | 21 | 23 | 52 | |
| Type d'examen complémentaire | | | | | |
| Scanner | 1 | 8 | 9 | 18 | p = 0.38 |
| Autre examen d'imagerie | 0 | 1 | 1 | 2 | |
| Biologie + Radiologie | 0 | 1 | 0 | 1 | |
| Biologie | 2 | 1 | 2 | 5 | |
| Total | 8 | 21 | 23 | 52 | |
| Diagnostic évoqué | | | | | |
| Hémopathie | 2 | 1 | 2 | 5 | p = 0.34 |
| Autre cancer | 1 | 4 | 4 | 9 | |
| Autre | 0 | 4 | 2 | 6 | |
| Total | 3 | 9 | 8 | 20 | |

3. Examens d'imagerie

L'analyse statistique a pu mettre ici en évidence une différence significative ($p = 0.05$) dans l'équivalent en dose journalière attribué à un scanner abdominopelvien et la distance entre le lieu d'exercice et la CNPE de Cattenom.

Parmi les 8 praticiens exerçant à moins de 30 km de la centrale 12.5 % répondaient « 15 jours », 75 % « 150 jours » et 12.5 % « 365 jours ». Pour les 21 médecins exerçant à une distance comprise entre 30 et 50 km de la centrale, on retrouve 47.6 % de réponse « 15 jours », 19 % « 150 jours », 19 % « 365 jours » et 14.3 % « 1500 jours ». Enfin, pour les 23 répondants de la catégorie « 50-150 km », 21.7 % répondaient « 15 jours », 26.1 % « 150 jours », 26.1 % « 365 jours » et 26.1 % « 1500 jours ».

Par ailleurs, le croisement des autres questions de cette partie avec la donnée concernant la distance entre la CNPE Cattenom et le lieu de travail n'a pas permis de montrer de différence significative. Pour la modification des prescriptions d'imagerie ($p = 0.11$), pour l'alternative à la prescription d'imagerie ($p = 0.56$) et pour le questionnement vis-à-vis de la dose de rayonnement ionisant reçue par les patients ($p = 0.75$) (*Tableau VII*).

| | 0 à 30 km | 30 à 50 km | 50 à 150 km | Total | Test du Khi 2 |
|--|-----------|------------|-------------|-------|---------------|
| Modification de prescription d'imagerie médicale à cause du risque lié à l'exposition radiologique | | | | | |
| Jamais | 1 | 3 | 5 | 9 | p = 0.11 |
| Rarement | 5 | 7 | 4 | 16 | |
| Parfois | 1 | 8 | 11 | 20 | |
| Souvent | 0 | 3 | 3 | 6 | |
| Toujours | 1 | 0 | 0 | 1 | |
| Total | 8 | 21 | 23 | 52 | |
| Alternative choisie | | | | | |
| Remplacement | 6 | 10 | 12 | 28 | p = 0.56 |
| Report de l'examen | 1 | 3 | 2 | 6 | |
| Surveillance | 0 | 5 | 3 | 8 | |
| Total | 7 | 18 | 17 | 42 | |
| Interrogation sur la dose de rayonnement ionisant reçu par votre patient lors d'un examen d'imagerie | | | | | |
| Jamais | 0 | 4 | 2 | 6 | p = 0.75 |
| Rarement | 2 | 5 | 6 | 13 | |
| Parfois | 3 | 9 | 9 | 21 | |
| Souvent | 3 | 2 | 5 | 10 | |
| Toujours | 0 | 1 | 1 | 2 | |
| Total | 8 | 21 | 23 | 52 | |
| Equivalent dose journalière d'exposition d'un scanner abdominopelvien | | | | | |
| 15 jours | 1 | 10 | 5 | 16 | p = 0.05 |
| 150 jours | 6 | 4 | 6 | 16 | |
| 365 jours | 1 | 4 | 6 | 11 | |
| 1500 jours | 0 | 3 | 6 | 9 | |

Tableau VI. Données croisées entre examens d'imagerie et distance à la CNPE de Cattenom

4. **Situations d'urgence**

Il n'y a pas de différence significative retrouvée entre la distance à la centrale et la capacité à évoquer un SAI ($p = 0.93$), la capacité à conseiller sur la prise de comprimés d'iode ($p = 0.35$), l'interlocuteur choisi en cas de suspicion d'exposition radiologique ($p = 0.77$) ni l'utilité ressentie à recevoir des messages d'alerte de la CNPE de Cattenom ($p = 0.67$) (*Tableau VIII*).

| | 0 à 30 km | 30 à 50 km | 50 à 150 km | Total | Test du Khi 2 |
|--|-----------|------------|-------------|-------|---------------|
| Capacité à évoquer un SAI devant des symptômes compatibles | | | | | |
| Jamais | 4 | 10 | 6 | 20 | p = 0.93 |
| Rarement | 2 | 5 | 8 | 15 | |
| Parfois | 1 | 3 | 5 | 9 | |
| Souvent | 0 | 1 | 1 | 2 | |
| Toujours | 1 | 2 | 3 | 6 | |
| Total | 8 | 21 | 23 | 52 | |
| Capacité à conseiller les patients sur la prise de comprimés d'iode en cas d'incident sur une CNPE | | | | | |
| Non | 5 | 18 | 19 | 42 | p = 0.35 |
| Oui | 3 | 3 | 4 | 10 | |
| Total | 8 | 21 | 23 | 52 | |
| Interlocuteur en cas de suspicion d'exposition radiologique à risque | | | | | |
| ARS | 0 | 3 | 3 | 6 | p = 0.77 |
| CRRA 15 | 2 | 3 | 5 | 10 | |
| IRSN | 2 | 3 | 5 | 10 | |
| Ne sait pas | 1 | 2 | 0 | 3 | |
| Médecin EDF | 1 | 1 | 0 | 2 | |
| Médecin du travail | 1 | 6 | 4 | 11 | |
| Médecin interniste | 0 | 0 | 2 | 2 | |
| Médecin nucléaire | 1 | 2 | 2 | 5 | |
| Radiologue | 0 | 1 | 1 | 2 | |
| Total | 8 | 21 | 23 | 52 | |
| Utilité ressentie des messages d'alerte de la CNPE de Cattenom | | | | | |
| Non | 0 | 2 | 2 | 4 | p = 0.67 |
| Oui | 8 | 19 | 21 | 48 | |
| Total | 8 | 21 | 23 | 52 | |

Tableau VII. Données croisées entre situation d'urgence et distance à la CNPE de Cattenom

Discussion

A. Forces et limites

1. Forces de l'étude

Notre étude avait pour vocation d'étudier le niveau de sensibilisation des médecins généralistes de Moselle au risque radiologique. Il s'agissait de la première étude traitant de ce sujet. Ce caractère novateur était sa principale force. Toutes les études réalisées en Europe abordent le risque lié à l'imagerie médicale mais aucune étude n'aborde le risque radiologique de manière globale. Pourtant, nous avons pu constater que l'exposition aux rayonnements ionisants pouvait provenir d'autres domaines de la vie courante comme la profession. De plus, au cours du travail de bibliographie, nous n'avons pu mettre en évidence qu'une seule étude réalisée sur les connaissances des médecins généralistes. Il s'agit de l'étude réalisée par S.Kada [54] qui concluait que les médecins généralistes de Bergen (Norvège) avaient peu de connaissances sur les doses de radiations reçues et sur les risques associés aux rayonnements ionisants. Toutefois, cette étude date de 2010. Toutes les autres études retrouvées, dont la seule étude française publiée par Gervaise et al [1], concernaient les praticiens hospitaliers. Il était donc intéressant de s'intéresser d'une part aux médecins généralistes et d'autre part au risque radiologique de façon plus large.

Le deuxième atout de cette étude était son caractère reproductible. En effet, à l'exception de la question concernant la distance par rapport à la centrale de Cattenom, le questionnaire que nous avons réalisé est susceptible de concerner tous les médecins généralistes français. Notre moyen de diffusion, à savoir l'envoi par mail du questionnaire par le biais de l'Ordre des Médecins de Moselle, serait également été possible dans les autres départements.

2. Limites de l'étude

Avec 52 médecins généralistes sur les 1893 inscrits sur la liste de diffusion de l'Ordre des Médecins de Moselle (soit 2.7%), cette étude souffrait d'un manque de puissance. Cette faible participation peut s'expliquer par différentes raisons. La première en est probablement le manque de temps rapporté de façon chronique par les médecins généralistes et poussant nécessairement à faire des choix dans l'utilisation de ce dernier. Nous avons également pâti de l'impossibilité d'effectuer une relance de notre questionnaire. Cela s'explique par la nécessité pour l'Ordre des Médecins de Moselle de ne pas surcharger les mails d'informations adressés aux praticiens et de répondre aux demandes de

tous les étudiants en matière de diffusion de questionnaire. De plus, l'intitulé de notre étude a pu rebuter certains praticiens craignant que ce questionnaire soit une évaluation des connaissances sur un domaine qu'ils pensent peut-être ne pas maîtriser. Ce genre de questionnaire favorise également la participation de médecins se sentant concernés par le sujet et ayant donc peut-être déjà été confrontés à la question du risque radiologique. Ce dernier point constitue un biais de recrutement dans notre étude.

Si cette étude venait à être reproduite, la participation pourrait être améliorée en contactant directement les praticiens par téléphone grâce à l'annuaire disponible sur le site internet de l'Ordre des Médecins. Le questionnaire serait rempli en direct puis rendu anonyme. Nous n'avons ici pas pu procéder de cette manière du fait du délai de 3 ans imparti pour valider la thèse de Docteur en Médecine.

3. Profil des participants

Les personnes ayant répondu à notre questionnaire étaient à 46.2% des femmes et à 53.8% des hommes. Ces chiffres sont superposables à la moyenne nationale qui retrouvait une proportion de femmes de 49.38% chez les médecins généralistes en 2021 [55]. Pour ce qui est du mode d'exercice, nous retrouvions 63.5% de médecins exerçant en libéral, 19.2% à l'hôpital et 17.3% ayant d'autres conditions de pratique. Ces résultats correspondent à ceux retrouvés pour la Moselle au 1^{er} janvier 2022 avec 60.7% des médecins exerçant exclusivement en libéral, 16.3% à l'hôpital et 14.7% rapportant d'autres modalités de salariat [56]. Concernant la présence ou non de collègue sur le lieu d'exercice, nous retrouvions 76.9% d'exercice en groupe, 17.3% seul et 5.8% d'activité mixte. A titre de comparaison, en 2019, 61% des médecins généralistes exerçaient en groupe [57]. Au regard de ces informations, nous pouvons dire que les médecins ayant répondu au questionnaire constituaient un échantillon plutôt représentatif des médecins généralistes de Moselle.

Au sujet du « délai depuis la fin de l'internat », on observe une différence entre nos résultats et les données départementales. Selon la Direction de la Recherche, des Etudes, de l'Evaluation et des Statistiques (DREES) [56], 24% des médecins généralistes mosellans ont moins de 39 ans, 13% ont entre 39 et 49 ans, 24% ont entre 49 et 59 ans et 37% ont plus de 59 ans. Ces chiffres diffèrent de 10% avec nos résultats pour les deux classes d'âge les plus jeunes ; et de 20% pour la classe des « plus de 59 ans ». De nos jours cette différence ne peut plus être attribuée à l'hypothèse d'un usage plus naturel des ordinateurs par la jeune génération. Nous supposons donc que c'est le biais de recrutement évoqué plus haut qui est à l'œuvre. Les médecins ayant fini leur internat il y a peu de temps ayant pu être récemment formés au sujet du risque radiologique, quand les praticiens plus expérimentés douteraient plus de leurs connaissances à ce sujet.

Il est difficile de comparer nos données sur la distance entre le lieu de travail et la centrale nucléaire de Cattenom avec des données officielles. En revanche, nous pouvons tenter d'expliquer les variations de répartition observées par la présence à environ 36km de la centrale, donc dans la tranche « 30-50km », de la ville de Metz qui comptait plus de 118 000 habitants en 2019 [58].

B. Analyse des réponses

1. Prise en compte du risque au travail

En matière d'exposition au risque radiologique dans le cadre professionnel, il apparaît que 15.4% des praticiens interrogés avaient déjà été confrontés à des résultats de surveillance d'exposition radiologique, soit presque 1 médecin sur 6. Ce chiffre démontre que la situation n'est pas rare et explique les réponses obtenues à la question de la prise en compte du risque radiologique lors des consultations. En effet, 78.8% des participants avaient déjà pensé au risque radiologique au cours de leurs consultations dont 7.7% qui y pensaient de façon systématique. Autre témoin de cette préoccupation dans la pratique de la médecine générale, la moitié des médecins sollicités (51.9%) avaient déjà prescrit des examens complémentaires en pensant à un risque radiologique. Les diagnostics envisagés étaient d'ailleurs tout à fait pertinents vis-à-vis de l'état actuel des connaissances en termes d'exposition aux rayonnements ionisants puisque 45% recherchaient des cancers solides et 25% des hémopathies. Pour objectiver ces pathologies, les praticiens avaient naturellement prescrit des examens d'imagerie et des bilans biologiques.

A la lumière de ces observations, on peut dire que les médecins généralistes ayant participé à l'étude sont sensibles à la prise en compte du risque radiologique lié à la profession des patients. Cette prise en compte a déjà conduit 1 praticien sur 2 à rechercher des pathologies associées au moyen d'examens complémentaires.

2. Risque lié à l'imagerie médicale

L'un des moyens privilégiés dans la littérature pour évaluer les connaissances des médecins sur l'exposition aux rayonnements ionisants des examens d'imagerie est de poser la question des équivalents de dose. Dans leur étude, Shiralkar et al évaluaient la capacité des médecins à estimer les doses de rayonnements ionisants reçus entre une radiographie pulmonaire et d'autres examens d'imagerie courants [59]. Ils ont ainsi montré que 97% des réponses sous-estimaient les doses effectivement reçues. Pour

rappel, une radiographie pulmonaire de face équivaut à 6 jours d'irradiation naturelle et un scanner abdominopelvien à 1500 jours [60]. Les résultats obtenus dans ce travail sont un peu meilleurs puisque 17.3% des participants estimaient correctement l'équivalent dose journalière d'exposition d'un scanner abdominopelvien. C'est un taux de bonne réponse qui demeure faible mais le reste des questions posées nous autorise à nous demander si cette question théorique est vraiment le meilleur des indicateurs. Dans la pratique, 82,7% des médecins interrogés avaient déjà modifié une prescription d'imagerie médicale à cause du risque lié à l'exposition au rayonnement ionisant. Pour la plupart (66.7%), cela avait conduit à la prescription d'un autre examen d'imagerie moins irradiant. A cela s'ajoute le fait que 88.5% des praticiens s'étaient déjà interrogés sur la dose de rayonnement ionisant reçue par leur patient lors d'un examen d'imagerie.

Il est ici légitime de penser que si les participants manquent peut-être de formation théorique ou de données chiffrées sur les doses reçues lors des examens, cette problématique n'est pas occultée pour autant car cette préoccupation est rapportée au moins une fois par la plupart des praticiens.

3. Aisance en situation d'urgence

Nos résultats nous permettent de constater que 61.5% des médecins ayant renvoyé le questionnaire rapportaient penser au SAI devant un tableau compatible. Ce chiffre est encourageant et plutôt en accord avec les éléments précédemment mis en évidence. En parallèle, 44% des médecins avaient répondu vouloir se tourner vers l'IRSN en cas de suspicion d'exposition radiologique anormale d'un patient. Ce chiffre est également une bonne nouvelle car l'IRSN doit être avertie urgemment en cas d'exposition pour pouvoir procéder aux mesures dosimétriques. C'est le CRRA 15 et l'ARS qui étaient cités en seconde position avec le même nombre de réponses. Ces données diffèrent de celles recueillies par M.Basely [61] qui retrouvait que 77% des praticiens se tourneraient vers le CRRA 15 dans la situation évoquée. Toutefois, ce résultat est à nuancer car l'IRSN faisait partie des options proposées et il n'est pas certain que les praticiens penseraient spontanément à les contacter dans un contexte d'urgence. Ce serait alors probablement vers le CRRA qu'ils se tourneraient. Dans leur grande majorité (80.8%), les médecins ne s'estimaient pas capables de conseiller les patients sur la prise des comprimés d'iode en cas d'incident à la CNPE. On retrouve donc ici la problématique du manque de données théoriques. Néanmoins il ne s'agit pas ici d'un obstacle majeur car la plupart des informations nécessaires telles que la posologie et les modalités de prise sont disponibles et facilement accessibles sur le site internet de l'IRSN. Au Luxembourg, les médecins reçoivent une alerte par mail de la part de la CNPE de Cattenom

en cas d'incident ou d'exercice. Les médecins français interrogés souhaiteraient à 92.3% recevoir ces mêmes messages d'alerte.

Dans l'hypothèse d'une situation d'urgence radiologique, les réponses à ce questionnaire laissent présager que les médecins auraient pour beaucoup de bons réflexes.

4. Propositions d'approfondissement

Cette partie apporte une nouvelle preuve de la bonne volonté et de la motivation des médecins généralistes qui souhaitaient à 90.4% recevoir des informations supplémentaires ou peut-être un rappel des grandes notions concernant le risque radiologique. Les moyens de communication les plus plébiscités étaient les séances de formations continues et les mails. Les séances de formation continue offrent la possibilité de poser des questions et correspondent mieux aux personnes à mémoire auditive. Les courriels ont l'avantage d'être accessibles au plus grand nombre et donnent accès aux informations importantes en un temps restreint. Ces derniers peuvent également être sauvegardés et rendre l'information consultable à tout moment.

5. Lien entre niveau de sensibilisation et distance à la centrale nucléaire

L'analyse statistique du degré de sensibilisation par rapport à la distance séparant le lieu de travail de centrale de Cattenom ne permettait globalement pas de mettre en évidence de différence significative. La seule question dont les réponses différaient vraiment en fonction de la variable de la distance est celle de l'équivalent en dose journalière du scanner abdomino-pelvien. Les praticiens travaillant à moins de 30km de la CNPE avaient tendance à sous-estimer davantage l'irradiation induite par cet examen. Le fait d'habiter à proximité de la CNPE induirait-il une banalisation du risque qui expliquerait la sous-estimation des doses reçues ?

Cette seule question ne permet cependant pas de conclure sur l'existence d'une relation entre niveau de sensibilisation et distance du lieu d'exercice par rapport à la centrale.

Conclusion

De par sa situation géographique et son activité industrielle, nous avons pu voir que la Moselle occupait une place à part dans le paysage français en terme d'exposition aux rayonnements ionisants. La littérature en matière de sensibilisation au risque radiologique des médecins n'a jamais exploré ni le risque radiologique global, ni les connaissances des praticiens généralistes. Ce travail proposait donc de décrire le degré d'initiation des médecins généralistes mosellans à ce sujet au travers d'une étude transversale. L'objectif secondaire était d'étudier la corrélation entre le niveau de sensibilisation et la distance séparant le lieu d'exercice de la CNPE de Cattenom.

Les réponses ont été recueillies auprès de 52 praticiens qui formaient une population plutôt représentative de celle des médecins généralistes mosellans d'un point de vue épidémiologique. Le questionnaire s'articulait autour des grands axes composant le risque radiologique.

Nous avons ainsi exploré la question de l'exposition aux rayonnements ionisants au travail. Seuls 15.4 % des médecins avaient déjà été confrontés à des résultats de surveillance d'exposition radiologique. En revanche, 4 médecins sur 5 déclaraient avoir déjà pris en compte le risque radiologique dans le cadre de l'exposition au travail au cours d'une consultation. De plus, la moitié d'entre eux avaient déjà prescrit des examens complémentaires à la recherche de pathologies découlant de cette exposition. 45 % recherchaient des tumeurs et 25 % des hémopathies, ce qui expliquait la prescription d'imagerie à 85.2 % et de bilan biologique à 14.8 %.

Concernant la prescription d'imagerie médicale, 92.7 % des praticiens interrogés avaient déjà modifié une prescription d'imagerie du fait du risque radiologique. L'alternative choisie était pour deux-tiers d'entre eux de le remplacer par un examen moins irradiant. De la même façon, la grande majorité (88.5 %) des médecins s'étaient déjà interrogés sur la dose de rayonnements ionisants reçue par leurs patients lors d'une imagerie. En revanche, seul 17.3 % d'entre eux estimaient correctement l'équivalent en dose journalière d'exposition d'un scanner abdominopelvien.

Au sujet des situations d'urgence, 61.5 % des praticiens déclaraient avoir déjà pensé au SAI devant un patient présentant des symptômes compatibles. Mais 80.8 % ne s'estimaient pas en mesure de conseiller les patients sur la prise de comprimés d'iode dans un contexte d'incident ou d'accident de CNPE. Nous les avons également interrogés sur l'interlocuteur qu'ils chercheraient à joindre en cas de suspicion d'exposition radiologique délétère pour un de leur patient. La réponse la plus fréquente était

l'IRSN, suivie par le CRRA 15 et l'ARS. Enfin, 92.3 % des médecins ayant répondu au questionnaire jugeaient utile de recevoir des messages d'alerte de la CNPE de Cattenom.

90.4 % des participants à notre étude souhaitaient recevoir davantage d'informations sur le risque radiologique. Différents médias étaient proposés dans le questionnaire pour mettre en lumière ceux qui devraient être privilégiés. A nombre égal de réponses, ce sont les séances de formation continue et les mails qui sont apparus comme étant les moyens d'informations plébiscités par les praticiens.

L'objectif secondaire était d'étudier le lien entre niveau de sensibilisation au risque radiologique et distance entre le lieu principal d'exercice et la CNPE de Cattenom. L'analyse statistique n'a pas permis de mettre en évidence une différence significative dans les réponses en les pondérant par la distance.

Au total, tous ces résultats dressent le tableau d'une population de médecins généralistes conscients du risque radiologique dans ses différents aspects. Ce risque est pris en compte dans les consultations, tant au niveau des diagnostics évoqués que des examens d'imagerie prescrits. Comme dans la littérature existante, nous retrouvons des connaissances théoriques qui gagneraient à être complétées en matière de radioprotection. Cependant, certaines pratiques sont déjà présentes dans les cabinets comme le report ou le changement des examens d'imagerie. Cette constatation ouvre la réflexion sur le meilleur marqueur du niveau des médecins dans le domaine de la prévention du risque radiologique. En effet, nous avons mis en évidence que l'attitude des praticiens est globalement adaptée malgré la carence de savoirs théoriques chiffrés. Des études futures pourraient privilégier l'évaluation de l'attitude des médecins en tant que prescripteur d'imagerie médicale plutôt que leurs notions en termes de dose reçue. De plus, les médecins interrogés sont demandeurs d'informations supplémentaires concernant le risque radiologique, que celles-ci émanent d'autorités scientifiques ou de la CNPE de Cattenom elle-même.

Au vu de l'intérêt en matière de formation concernant l'exposition aux rayonnements ionisants et en prenant en compte nos résultats sur les médias les plus adaptés, une nouvelle question se dessine. En effet, il pourrait être intéressant d'étudier l'impact d'une formation sur l'aisance des médecins généralistes vis-à-vis du risque radiologique. Cette problématique pourra notamment faire l'objet d'un nouveau travail de thèse.

Bibliographie

- [1] Gervaise A, Esperabe-Vignau F, Pernin M, Naulet P, Portron Y, Lapierre-Combes M. Évaluation des connaissances des prescripteurs de scanner en matière de radioprotection des patients. *Journal de Radiologie*. 1 juill 2011;92(7):681-7.
- [2] Directive 2013/59/Euratom du Conseil du 5 décembre 2013 fixant les normes de base relatives à la protection sanitaire contre les dangers résultant de l'exposition aux rayonnements ionisants et abrogeant les directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom et 2003/122/Euratom. *Légifrance* [Internet]. 4 juin 2018 [cité 6 déc 2021]. Disponible sur : <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000028525741/>
- [3] Khater A. Introduction à la physique nucléaire - Historique. *Numéliphy.unisciel* [Internet]. 16 juin 2009 [cité 2 déc 2021]. Disponible sur : http://res-nlp.univ-lemans.fr/NLP_C_M13_G01/co/Module_NLP_C_M13_G01_1.html
- [4] Pavel I. Niels Bohr, le père de l'atome. *Bibnum Textes fondateurs de la science* [Internet]. 1 déc 2013 [cité 2 déc 2021]; Disponible sur : <https://journals.openedition.org/bibnum/823#tocto1n3>
- [5] Delpas C, Frija G, Mazoyer B. L'imagerie médicale.pdf. *Fondation recherche médicale* [Internet]. juin 2002 [cité 6 déc 2021]. Disponible sur : [https://tp.physique.usherbrooke.ca/experiences_fichiers/Gamma-Tomographie/Fichiers%20de%20reference%20\(.pdf\)/imageriemed.pdf](https://tp.physique.usherbrooke.ca/experiences_fichiers/Gamma-Tomographie/Fichiers%20de%20reference%20(.pdf)/imageriemed.pdf)
- [6] Zanter JP. The story of the discovery of X rays. *Bulletin de la Société des Sciences Médicales du Grand-Duché du Luxembourg*. 1999;(2):83-113.
- [7] Foasso C. Histoire de la sûreté de l'énergie nucléaire civile en France (1945-2000). Lyon : Université Lumière Lyon 2 ; 2003
- [8] Rousseau JC. L'énergie nucléaire : une brève histoire. *Encyclopédie de l'énergie*. [Internet]. 14 décembre 2015 [cité 11 déc 2021]. Disponible sur : <https://www.encyclopedie-energie.org/histoire-de-lenergie-nucleaire/>
- [9] Kriz Z, Ruatti D. 10th anniversary of the International Nuclear Event Scale (INES). *International Atomic Energy Agency (IAEA)*. 2000 ; p. 89-94.

- [10] L'échelle INES. IRSN. [Internet]. septembre 2009 [cité 31 janv 2022]. Disponible sur : https://www.irsn.fr/FR/connaissances/Installations_nucleaires/La_surete_Nucleaire/echelle-ines/Pages/sommaire.aspx#.Yff-w5qZOM8
- [11] Lévêque F. Le risque d'accident nucléaire majeur: calcul et perception des probabilités. HAL [Internet]. 27 fév 2013 [cité 11 déc 2021]. Disponible sur : <https://hal.science/hal-00795118v1>
- [12] De Choudens H. Le risque nucléaire. Institut des Risques Majeurs. [Internet]. juin 2013 [cité 27 janv 2022]. Disponible sur : http://www.irma-grenoble.com/PDF/05documentation/rapports_irma/3_Les_accidents.pdf
- [13] Drouelle F. Affaires sensibles. [Internet]. Paris (FR): France Inter; 2017 [Balado] Le jour où les Américains ont égaré une bombe atomique. [cité 27 janv 2022]. Disponible sur : <https://www.franceinter.fr/emissions/affaires-sensibles/affaires-sensibles-20-juin-2017>
- [14] Lung M. Analyse critique des risques d'incidents majeurs dans l'énergie nucléaire civile. Association des Ecologistes pour le Nucléaire. 5 septembre 2002. p. 19.
- [15] Les conséquences sanitaires. IRSN. [Internet]. 21 mai 2012. [cité 25 févr 2023]. Disponible sur : https://www.irsn.fr/fr/connaissances/installations_nucleaires/les-accidents-nucleaires/accident-tchernobyl-1986/consequences-homme-environnement/pages/8-les_consequences_sanitaires.aspx#.Y_nSzGSZOM8
- [16] Biau A. Accident de Forbach 1991. Société Française de Radioprotection. [Internet]. 19 octobre 2011. [cité 27 janv 2022]. Disponible sur : https://sfrp.asso.fr/wp-content/uploads/2021/05/Accident_de_Forbach_de_1991_A_Biau_-2.pdf
- [17] Lexique de l'Autorité de sûreté nucléaire - Accident de criticité [Internet] Autorité de sûreté nucléaire (ASN). [cité 3 févr 2022]. Disponible sur : <https://www.asn.fr/lexique/a/Accident-de-criticite>
- [18] Direction de la sûreté des usines, des laboratoires, des transports et des déchets. Les accidents de criticité dans l'industrie nucléaire. IRSN. [Internet] (FR); octobre 2009 [cité 3 févr 2022]. Disponible sur : https://www.irsn.fr/FR/Actualites_presse/Communiqués_et_dossiers_de_presse/Documents/IRSN_ni_Accidents_Criticite_102009.pdf

- [19] Leers Y. L'accident nucléaire de Tokai-Mura. Encyclopædia Universalis [Internet]. [cité 3 févr 2022]. Disponible sur : <https://www.universalis.fr/encyclopedie/accident-nucleaire-de-tokai-mura/>
- [20] IRSN. Tokai-Mura, le point sur l'accident de septembre 1999. IRSN [Internet]. 7 septembre 2009 [cité 3 févr 2022]. Disponible sur : https://www.irsn.fr/FR/Actualites_presse/Communiqués_et_dossiers_de_presse/Pages/tokai-mura_point_accident_0999.aspx#.Yfu2t5qZOM8
- [21]. AIEA. L'accident radiologique de Goiânia. AIEA [Internet]. décembre 1989 [cité 9 mai 2022]. Disponible sur : <https://www.iaea.org/fr/publications/4023/laccident-radiologique-de-goiania>
- [22] De Choudens H. Les grands accidents nucléaires et leurs conséquences. Institut des Risques Majeurs. [Internet]. juin 2013 [cité 9 févr 2022]. Disponible sur : http://www.irma-grenoble.com/PDF/05documentation/rapports_irma/3_Les_accidents.pdf
- [23] IRSN. L'accident en radiothérapie d'Épinal. IRSN [Internet]. mars 2013 [cité 12 mai 2022]. Disponible sur : <https://www.irsn.fr/FR/connaissances/Sante/exposition-patients-sante-radioprotection/accidents-sanitaires/accident-radiotherapie-epinal/Pages/sommaire.aspx#.Yn0eAIZP2M8>
- [24] Peiffert D, Simon JM, Eschwege F. L'accident d'Épinal : passé, présent, avenir. *Cancer/Radiothérapie*. novembre 2007; Volume (11); Issues 6-7; page 309-312
- [25] Buisson Y, Cavallo J, Kowalski J, Renaudeau C, Tréguier J. Les risques NRBC savoir pour agir. Xavier Montauban. octobre 2004. 240 p.
- [26] De Revel T, Gourmelon P, Vidal D, Renaudeau C. Menace terroriste nucléaire : approche médicale. John Libbey Eurotext; 2005. 432 p.
- [27] Singh VK, Romaine PLP, Newman VL, Seed TM. Medical countermeasures for unwanted CBRN exposures: part II radiological and nuclear threats with review of recent countermeasure patents. *Expert Opinion on Therapeutic Patents*. déc 2016;26(12):1399-408.
- [28] Jordan B. Les leçons inattendues d'Hiroshima - Chroniques génomiques. *Médecines/Sciences*. (Paris). 1 févr 2014;30(02):211-3.

- [29] INRS. Rayonnements ionisants - Ce qu'il faut retenir. INRS [Internet]. [cité 23 mai 2021]. Disponible sur : <https://www.inrs.fr/risques/rayonnements-ionisants/ce-qu-il-faut-retenir.html>
- [30] Reigner P, Carron PN, Yersin B, Egger E. Terrorisme et médecin de premier recours : risques nucléaire et radiologique. *Revue médicale suisse*. 2008;4(148):669-675 [6 p.].
- [31] Turai I, Veress K, Günalp B, Souchkevitch G. Medical response to radiation incidents and radionuclear threats. *British Medical Journal*. 6 mars 2004;328(7439):568-72.
- [32] Ju YS, Jhun HJ, Kim JB, Kim JK. Non-cancer diseases of Korean atomic bomb survivors in residence at Hapcheon, Republic of Korea. *Journal of Korean Medical Science*. juin 2006;21(3):385-90.
- [33] Douple EB, Mabuchi K, Cullings HM, Preston DL, Kodama K, Shimizu Y, Fujiwara S, Shore RE. Long-term radiation-related health effects in a unique human population: lessons learned from the atomic bomb survivors of Hiroshima and Nagasaki. *Disaster Med Public Health Preparedness*. mars 2011;5 Suppl 1:S122-133.
- [34] IRSN. Les conséquences des rayonnements ionisants. IRSN. [Internet]. 21 mai 2012 [cité 16 oct 2022]. Disponible sur : <https://www.irsn.fr/FR/connaissances/Sante/rayonnements-ionisants-effets-radioprotection-sante/effets-rayonnements-ionisants/Pages/4-consequences-niveau-cellule.aspx#.Y0wjKtfP2M9>
- [35] UNSCEAR Sources and effects of ionizing radiation. UNSCEAR 2008 report - Vol. I: Sources [Internet]. 2010 [cité 31 janv 2022]. Disponible sur : http://www.unscear.org/unscear/en/publications/2008_1.html
- [36] IRSN Les radionucléides d'origine naturelle. IRSN. [Internet]. 7 janvier 2013 [cité 23 oct 2022]. Disponible sur : <https://www.irsn.fr/FR/connaissances/Environnement/radioactivite-environnement/sources-radioactivite/Pages/2-radionucleides-origine-naturelle.aspx?dId=2ef28ef7-3363-4bed-b7b3-47a597e68d1d&dwId=02b23d3f-13d2-4faa-ab26-1e26e8c4700c#.Y1VBrLbP2M8>
- [37] ASN. Le cadre général de la législation et de la réglementation des activités nucléaires. ASN [Internet]. 13/01/2022 [cité 23 oct 2022]. Disponible sur : <https://www.asn.fr/l-asn-reglemente/la-reglementation/le-cadre-general-de-la-legislation-et-de-la-reglementation-des-activites-nucleaires>

- [38] IRSN. L'exposition à la radioactivité artificielle en France. IRSN [Internet]. 16 septembre 2016 [cité 23 oct 2022]. Disponible sur : <https://www.irsn.fr/FR/connaissances/Sante/exposition-population/exposition-population-france-metropole/Pages/3-Exposition-population-France-radioactivite-artificielle.aspx#.Y1VgGLbP2M8>
- [39] IRSN. La CIPR 103 disponible en français. IRSN. [Internet]. 4 juin 2009 [cité 24 sept 2022]. Disponible sur : https://www.irsn.fr/FR/Larecherche/Actualites_Agenda/Actualites/Pages/La-CIPR-103-disponible-en-francais-5192.aspx#.Yy8sJKTP2M8
- [40] IRSN. Modalités de surveillance de l'exposition des travailleurs. IRSN [Internet]. 25 octobre 2018 [cité 16 janv 2023]. Disponible sur : <https://www.irsn.fr/FR/connaissances/Sante/exposition-travailleurs-sante-radioprotection/radioprotection-travailleurs/bilan-annuel-exposition-travailleurs-France/Pages/1-Exposition-travailleurs-France-modalites-surveillance.aspx#.Y8WQA5iZOM8>
- [41] IRSN. Fiches radionucléides. IRSN [Internet]. 19 janvier 2011 [cité 21 nov 2022]. Disponible sur : <https://www.irsn.fr/FR/Larecherche/publications-documentation/fiches-radionucleides/Pages/Fiches-radionucleides.aspx#.Y3t2vMeZOM8>
- [42] IRSN. Rayonnements ionisants et accidents d'irradiation. IRSN [Internet]. [cité 31 janv 2022]. Disponible sur : https://www.irsn.fr/FR/Actualites_presse/Communiqués_et_dossiers_de_presse/Documents/IRSN_rayonnements_ionisant_et_accidents_d_irradiation.pdf
- [43] Planas O. L'énergie nucléaire dans l'industrie. Energie Nucléaire. [Internet]. 25 mai 2010 [cité 11 nov 2022]. Disponible sur : <https://energie-nucleaire.net/applications/energie-nucleaire-industrie>
- [44] EDF. Centrales nucléaires : prévenir les accidents et crises. EDF. [Internet]. 2022 [cité 11 nov 2022]. Disponible sur : <https://www.edf.fr/groupe-edf/produire-une-energie-respectueuse-du-climat/lenergie-nucleaire/notre-vision/garantir-la-surete-des-installations/prevenir-et-gerer-les-risques>

- [45] ASN. Surdosages lors de traitements par radiothérapie externe dus à une erreur d'étalonnage. ASN. [Internet]. [cité 11 nov 2022]. Disponible sur : <https://www.asn.fr/l-asn-contrôle/actualités-du-contrôle/activités-médicales/avis-d-incident-affectant-un-patient-en-radiothérapie/surdosages-lors-de-traitements-par-radiothérapie-externe-dus-a-une-erreur-d-etalonnage>
- [46] Jalouneix J. Sécurité des sources radioactives. IRSN. [Internet]. 2015 [cité 11 nov 2022]. Disponible sur : https://www.irsn.fr/sites/default/files/documents/larecherche/publications-documentation/collection-ouvrages-irsn/SNP_fran%C3%A7ais_WEB_NB_Chapitre2.pdf
- [47] IRSN. Exposition de la population française aux rayonnements ionisants - Bilan 2014-2019. IRSN [Internet]. 2021 [cité 27 nov 2022]. Disponible sur : https://www.irsn.fr/FR/Actualites_presse/Communiqués_et_dossiers_de_presse/Documents/IRSN_Rapport%20EXPOP_def.pdf
- [48] IRSN. Connaître le potentiel radon de ma commune. IRSN. [Internet]. janvier 2021 [cité 27 nov 2022]. Disponible sur : <https://www.irsn.fr/FR/connaissances/Environnement/expertises-radioactivite-naturelle/radon/Pages/5-cartographie-potentiel-radon-commune.aspx#.Y4O76EmZOM->
- [49] IRSN. Constat radiologique "Rémanence de la radioactivité d'origine artificielle". IRSN [Internet]. 2016 [cité 27 nov 2022]. Disponible sur : https://www.irsn.fr/FR/connaissances/Environnement/Etudes-complémentaires/etats-radiologiques-regionaux/Pages/constat_zone_remanence.aspx?dId=074dd78e-2cbc-49b7-9906-84aa261331b5&dwId=82236801-e43c-425a-811a-485d5c58e8bc#.Y4PBvUmZOM-
- [50] IRSN. Constat radiologique Nord-Est - Rapport de mission 2020. IRSN [Internet]. juillet 2020 [cité 27 nov 2022]. Disponible sur : https://www.irsn.fr/FR/expertise/rapports_expertise/surveillance-environnement/Documents/IRSN_Constat-radiologique-Nord-Est-2-202007.pdf
- [51] Fratacci S. Evolution de la doctrine nationale pour l'élaboration des PPI autour des installations nucléaires de base (INB - INBS). Moselle.gouv. [Internet]. 1 août 2018 [cité 27 nov 2022]. Disponible sur : [https://www.moselle.gouv.fr/content/download/20790/144438/file/Instruction%20INTA1815747J%20\(01-08-2018\).pdf](https://www.moselle.gouv.fr/content/download/20790/144438/file/Instruction%20INTA1815747J%20(01-08-2018).pdf)

- [52] Martin D. Dossier Départemental des Risques Majeurs en Moselle. Moselle.gouv. [Internet]. 17décembre 2018 [cité 27 nov 2022]. Disponible sur : <https://www.moselle.gouv.fr/content/download/13944/104136/file/DDRM%20en%20Moselle.pdf>
- [53] ASN. Centrale nucléaire de Cattenom. ASN [Internet]. 17 mai 2022 [cité 27 nov 2022]. Disponible sur : <https://www.asn.fr/tout-sur-l-asn/l-asn-en-region/grand-est/centrale-nucleaire-de-cattenom>
- [54] Kada S. A study of general practitioners' knowledge of ionizing radiation from diagnostic imaging examinations. *Quality in Primary Care*. 2010;18(6):391-7.
- [55] Juanole L. Féminisation de la profession : ces femmes derrière les chiffres. *Le Généraliste* [Internet]. 13 septembre 2021 [cité 8 févr 2023]. Disponible sur : <https://www.legeneraliste.fr/actu-pro/politique-de-sante/feminisation-de-la-profession-ces-femmes-derriere-les-chiffres>
- [56] DREES. Démographie des professionnels de santé. DREES [Internet]. 1 janvier 2022 [cité 28 févr 2023]. Disponible sur : <https://drees.shinyapps.io/demographie-ps/>
- [57] ARS. Plus de 80 % des médecins généralistes libéraux de moins de 50 ans exercent en groupe. ARS [Internet]. 21 mai 2019 [cité 8 févr 2023]. Disponible sur : <https://www.ars.sante.fr/plus-de-80-des-medecins-generalistes-liberaux-de-moins-de-50-ans-exercent-en-groupe>
- [58] INSEE. Dossier complet – Commune de Metz (57463). Insee [Internet]. 23 janvier 2023 [cité 1 mars 2023]. Disponible sur : <https://www.insee.fr/fr/statistiques/2011101?geo=COM-57463>
- [59] Shiralkar S, Rennie A, Snow M, Galland RB, Lewis MH, Gower-Thomas K. Doctors' knowledge of radiation exposure: questionnaire study. *British Medical Journal*. 16 août 2003;327(7411):371-2.
- [60] AFCN. Comparaison des doses de rayonnements [Internet]. AFCN. 6 juillet 2020 [cité 21 mars 2023]. Disponible sur : <https://afcn.fgov.be/fr/dossiers/applications-medicales/comparaison-des-doses-de-rayonnements>
- [61] Basely M. Exposition insidieuse aux rayonnements ionisants : Enquête sur l'alerte par les premiers intervenants médicaux. [Internet]. (FR) : 30 juin 2010; [cité 21 mars 2023]

Annexe

A. Questionnaire

1^{ère} partie questionnaire : Introduction

Bonjour, et d'abord merci à vous pour les quelques minutes que vous allez prendre pour répondre à ce questionnaire. Le recueil de données est à la base de mon travail de thèse et sans ces réponses pas de thèse possible, donc merci à vous !

Le risque radiologique est présent naturellement et artificiellement dans notre quotidien. La Moselle est particulièrement concernée dans le domaine industriel avec la Centrale Nucléaire Productrice d'Energie (CNPE) de Cattenom, ainsi que dans le domaine médical avec 32 établissements de santé et plus d'une dizaine de cabinets d'imagerie répertoriés. Comme partout en France, le département est également exposé au risque émanant de l'industrie non nucléaire, de la défense et de la radioactivité naturelle.

Actuellement, il n'existe pas de données sur le niveau de sensibilisation des médecins généralistes français en termes de risque radiologique global.

Pourtant, entre examens d'imagerie, risques liés à la profession des patients et menace d'attentat ou d'accident à caractère nucléaire et radiologique, les praticiens mosellans sont au cœur de ce sujet.

2^{ème} partie questionnaire : données épidémiologiques

- Vous êtes : un homme une femme non binaire

- Vous avez fini votre internat il y a : moins de 10 ans 10 à 20 ans 20 à 30 ans
 30 à 40 ans plus de 40 ans

- Quel est votre mode d'exercice ? cabinet maison de santé hospitalier
 centre municipal autre

- Exercez-vous à plusieurs ? oui non activité mixte

- A quelle distance de la centrale nucléaire de Cattenom se situe votre lieu d'exercice principal ? moins de 10km entre 10 et 30km entre 30 et 50km entre 50 et 100km entre 100 et 150km

3^{ème} partie questionnaire : Niveau de sensibilisation - Exposition au travail

De par son activité professionnelle votre patient est soumis à un risque d'exposition radiologique (travailleur de la Centrale Nucléaire de Production d'Electricité (CNPE) de Cattenom, manipulateurs radio, personnel naviguant...).

- Lorsque vous le voyez en consultation, prenez-vous ce risque en compte ?

VU

NANCY, le **02 avril 2023**
Le Président de Thèse

NANCY, le **3 avril 2023**
Le Doyen de la Faculté de Médecine

Professeur Paolo DI PATRIZIO

Professeur Marc BRAUN

AUTORISE À SOUTENIR ET À IMPRIMER LA THÈSE/ **12922C**

NANCY, le **06 avril 2023**

La Présidente de l'Université de Lorraine

Madame Hélène BOULANGER

RESUME DE LA THESE :

Le risque radiologique, comme tout facteur de risque, doit être connu des médecins. Il n'existe pas d'étude européenne concernant le risque radiologique global et les médecins généralistes. Nous avons donc étudié le niveau de sensibilisation des médecins généralistes de Moselle au risque radiologique. L'objectif secondaire recherchait un lien avec l'éloignement de la CNPE de Cattenom. Ce travail était une étude observationnelle et descriptive. Grâce à la liste de diffusion électronique de l'Ordre des Médecins de Moselle nous avons transmis un questionnaire aux praticiens généralistes portant sur l'exposition professionnelle, l'imagerie médicale, les situations d'urgence et les pistes d'amélioration de la formation. Nous avons reçu 52 réponses du 3 avril au 11 juillet 2022. Seuls 15.4 % avaient déjà reçu des résultats de surveillance d'exposition radiologique. Mais environ 80 % déclaraient prendre en compte ce risque dans le cadre du travail. La moitié avait déjà recherché des diagnostics associés. 92.7 % avaient déjà modifié une prescription d'imagerie du fait du risque radiologique. Moins de 20 % répondaient correctement aux questions théoriques et s'estimaient capables de prescrire les comprimés d'iode. La majorité déclarait chercher à joindre l'IRSN en cas de situation d'urgence. 90.4 % souhaitaient être plus informés. Nous n'avons pas mis en évidence de lien entre le degré d'initiation au risque radiologique et la distance entre le lieu de travail et la CNPE de Cattenom. Notre échantillon était représentatif des médecins généralistes français. Les médecins généralistes sont conscients du risque radiologique et demandeurs de formation à ce sujet.

TITRE EN ANGLAIS :

Level of awareness of general practitioners in Moselle regarding radiological risk: an observational and descriptive study.

SPECIALITE ET ANNEE : Médecine Générale, 2023

MOTS CLES :

Exposition aux rayonnements ; Rayonnement ionisant ; Médecins généralistes ; Imagerie médicale ; Contrôle des radiations ; Savoir

ADRESSE DE LA FACULTE :

Université de Nancy, Faculté de Médecine
Campus Brabois Santé
9, Avenue de la Forêt de Haye BP 20199
54505 Vandoeuvre lès Nancy
