

UNIVERSITÉ DE STRASBOURG
FACULTÉ DE MÉDECINE, MAÏEUTIQUE ET SCIENCES DE LA SANTÉ

ANNÉE : 2024

N° : 234

THÈSE
PRÉSENTÉE POUR LE DIPLÔME D'ÉTAT
DE DOCTEUR EN MÉDECINE

Diplôme d'État

Mention : Médecine et Santé au Travail

PAR

SCHMITT Guillaume

Né le 10/03/1993, à Besançon (25)

**Effets sanitaires des rayonnements ionisants à faibles doses
et suivi post-professionnel : autour d'un cas de
contamination historique au radium et au radon**

Synthèse de la littérature depuis 2000

Président de thèse : Madame le Professeur Maria GONZALEZ

Co-directeur de thèse : Madame le Docteur Stéphanie SCARFONE

LISTE DES ENSEIGNANTS



FACULTÉ DE MÉDECINE, MAÏEUTIQUE ET SCIENCES DE LA SANTÉ

Edition AVRIL 2024
Année universitaire 2023-2024

- **Président de l'Université**
- **Doyen de la Faculté**
- **Première Vice Doyenne de la Faculté**
- **Doyens honoraires :** (1989-1994)
(1994-2001)
(2001-2011)
- **Chargé de mission auprès du Doyen**
- **Responsable Administratif**

M. DENEKEN Michel
M. SIBILIA Jean
Mme CHARLOUX Anne
M. VINCENDON Guy
M. GERLINGER Pierre
M. LUDES Bertrand
M. VICENTE Gilbert
M. STEEGMANN Geoffroy



HOPITAUX UNIVERSITAIRES
DE STRASBOURG (HUS)
Directeur général : M. HENNI Samir

A1 - PROFESSEUR TITULAIRE DU COLLEGE DE FRANCE

MANDEL Jean-Louis Chaire "Généétique humaine" (à compter du 01.11.2003)

A2 - MEMBRE SENIOR A L'INSTITUT UNIVERSITAIRE DE FRANCE (I.U.F.)

BAHRAM Séiamak Immunologie biologique
DOLLFUS Héléne Génétique clinique

A3 - PROFESSEUR(E)S DES UNIVERSITÉS - PRATICIENS HOSPITALIERS (PU-PH)

NOM et Prénoms	CS ²	Services Hospitaliers ou Institut / Localisation	Sous-section du Conseil National des Universités
ADAM Philippe	NRP0 CS	• Pôle de l'Appareil locomoteur - Service d'Hospitalisation des Urgences de Traumatologie / HP	50.02 Chirurgie orthopédique et traumatologique
ADDEO Pietro	NRP0 CS	• Pôle des Pathologies digestives, hépatiques et de la transplantation - Serv. de chirurgie générale, hépatique et endocrinienne et Transplantation/HP	53.02 Chirurgie générale
AKLADIOS Cherif	NRP0 CS	• Pôle de Gynécologie-Obstétrique - Service de Gynécologie-Obstétrique / HP	54.03 Gynécologie-Obstétrique ; gynécologie médicale Option : Gynécologie-Obstétrique
ANDRES Emmanuel	RP0 CS	• Pôle de Médecine Interne, Rhumatologie, Nutrition, Endocrinologie, Diabétologie (MIRNED) - Service de Médecine Interne, Diabète et Maladies métaboliques/HC	53.01 Option : médecine Interne
ANHEIM Mathieu	NRP0 NCS	• Pôle Tête et Cou-CETD - Service de Neurologie / Hôpital de Hautepierre	49.01 Neurologie
Mme ANTAL Maria Cristina	NRP0 CS	• Pôle de Biologie - Service de Pathologie / Hôpital de Hautepierre • Institut d'Histologie / Faculté de Médecine	42.02 Histologie, Embryologie et Cytogénétique (option biologique)
Mme ANTONI Delphine	NRP0	• Pôle d'Imagerie - Service de Radiothérapie / ICANS	47.02 Cancérologie ; Radiothérapie
ARNAUD Laurent	NRP0 NCS	• Pôle MIRNED - Service de Rhumatologie / Hôpital de Hautepierre	50.01 Rhumatologie
BACHELLIER Philippe	RP0 CS	• Pôle des Pathologies digestives, hépatiques et de la transplantation - Serv. de chirurgie générale, hépatique et endocrinienne et Transplantation/HP	53.02 Chirurgie générale
BAHRAM Seiamak	NRP0 CS	• Pôle de Biologie - Laboratoire d'Immunologie biologique / Nouvel Hôpital Civil - Institut d'Hématologie et d'Immunologie / Hôpital Civil / Faculté	47.03 Immunologie (option biologique)
BAUMERT Thomas	NRP0 CS	• Pôle Hépato-digestif de l'Hôpital Civil - Institut de Recherche sur les Maladies virales et hépatiques/Fac	52.01 Gastro-entérologie ; hépatologie Option : hépatologie
Mme BEAU-FALLER Michèle	NRP0 NCS	• Pôle de Biologie - Laboratoire de Biochimie et de Biologie moléculaire / HP	44.03 Biologie cellulaire (option biologique)
BEAUJEU Rémy	NRP0 CS	• Pôle d'Imagerie - CME / Activités transversales • Unité de Neuroradiologie interventionnelle / Hôpital de Hautepierre	43.02 Radiologie et imagerie médicale (option clinique)
BERNA Fabrice	NRP0 CS	• Pôle de Psychiatrie, Santé mentale et Addictologie - Service de Psychiatrie I / Hôpital Civil	49.03 Psychiatrie d'adultes ; Addictologie Option : Psychiatrie d'Adultes
BERTSCHY Gilles	RP0 CS	• Pôle de Psychiatrie et de santé mentale - Service de Psychiatrie II / Hôpital Civil	49.03 Psychiatrie d'adultes
BIERRY Guillaume	NRP0 NCS	• Pôle d'Imagerie - Service d'Imagerie II - Neuroradiologie-imagerie ostéoarticulaire-Pédiatrie/HP	43.02 Radiologie et Imagerie médicale (option clinique)
BILBAULT Pascal	RP0 CS	• Pôle d'Urgences / Réanimations médicales / CAP - Service des Urgences médico-chirurgicales Adultes / HP	48.02 Réanimation ; Médecine d'urgence Option : médecine d'urgence
BLANC Frédéric	NRP0 NCS	- Pôle de Gériatrie - Service Evaluation - Gériatrie - Hôpital de la Robertsau	53.01 Médecine interne ; addictologie Option : gériatrie et biologie du vieillissement
BODIN Frédéric	NRP0 NCS	• Pôle de Chirurgie Maxillo-faciale, morphologie et Dermatologie - Service de Chirurgie Plastique et maxillo-faciale / Hôpital Civil	50.04 Chirurgie Plastique, Reconstructrice et Esthétique ; Brûlologie
BONNEMAINS Laurent	NRP0 NCS	• Pôle médico-chirurgical de Pédiatrie - Service de Pédiatrie 1 - Hôpital de Hautepierre	54.01 Pédiatrie
BONNOMET François	NRP0 CS	• Pôle de l'Appareil locomoteur - Service d'Orthopédie-Traumatologie du Membre inférieur / HP	50.02 Chirurgie orthopédique et traumatologique
BOURCIER Tristan	NRP0 NCS	• Pôle de Spécialités médicales-Ophtalmologie / SMO - Service d'Ophtalmologie / Nouvel Hôpital Civil	55.02 Ophtalmologie

NOM et Prénoms	CS ²	Services Hospitaliers ou Institut / Localisation	Sous-section du Conseil National des Universités
BOURGIN Patrice	NRP0 CS	• Pôle Tête et Cou - CETD - Service de Neurologie - Unité du Sommeil / Hôpital Civil	49.01 Neurologie
Mme BRIGAND Cécile	NRP0 NCS	• Pôle des Pathologies digestives, hépatiques et de la transplantation - Service de Chirurgie générale et Digestive / HP	53.02 Chirurgie générale
BRUANT-RODIER Catherine	NRP0 CS	• Pôle de l'Appareil locomoteur - Service de Chirurgie Plastique et Maxillo-faciale / HP	50.04 Option : chirurgie plastique, reconstructrice et esthétique
Mme CAILLARD-OHLMANN Sophie	NRP0 NCS	• Pôle de spécialités médicales-Ophthalmologie / SMO - Service de Néphrologie-Dialyse et Transplantation / NHC	52.03 Néphrologie
CASTELAIN Vincent	NRP0 NCS	• Pôle Urgences - Réanimations médicales / Centre antipoison - Service de Réanimation médicale / Hôpital de Haute-pierre	48.02 Réanimation
Mme CEBULA Héléne	NRP0 NCS	• Pôle Tête-Cou - Service de Neurochirurgie / HP	49.02 Neurochirurgie
CHAKFE Nabil	NRP0 CS	• Pôle d'activité médico-chirurgicale Cardio-vasculaire - Serv. de Chirurgie vasculaire et de transplantation rénale NHC	51.04 Chirurgie vasculaire ; médecine vasculaire Option : chirurgie vasculaire
CHARLES Yann-Philippe	NRP0 NCS	• Pôle de l'Appareil locomoteur - Service de Chirurgie du rachis / Chirurgie B / HC	50.02 Chirurgie orthopédique et traumatologique
Mme CHARLOUX Anne	NRP0 NCS	• Pôle de Pathologie thoracique - Service de Physiologie et d'Explorations fonctionnelles / NHC	44.02 Physiologie (option biologique)
Mme CHARPIOT Anne	NRP0 NCS	• Pôle Tête et Cou - CETD - Serv. d'Oto-rhino-laryngologie et de Chirurgie cervico-faciale / HP	55.01 Oto-rhino-laryngologie
Mme CHENARD-NEU Marie-Pierre	NRP0 CS	• Pôle de Biologie - Service de Pathologie / Hôpital de Haute-pierre	42.03 Anatomie et cytologie pathologiques (option biologique)
CLAVERT Philippe	NRP0 CS	• Pôle de l'Appareil locomoteur - Service d'Orthopédie-Traumatologie du Membre supérieur / HP	42.01 Anatomie (option clinique, orthopédie traumatologique)
COLLANGE Olivier	NRP0 NCS	• Pôle d'Anesthésie / Réanimations chirurgicales / SAMU-SMUR - Service d'Anesthésiologie-Réanimation Chirurgicale / NHC	48.01 Anesthésiologie-Réanimation ; Méd. d'urgence (opt. Anesthésiologie-Réanimation - Type clinique)
COLLONGUES Nicolas	NRP0 NCS	• Pôle Tête et Cou-CETD - Centre d'Investigation Clinique / NHC et HP	49.01 Neurologie
CRIBIER Bernard	NRP0 CS	• Pôle d'Urologie, Morphologie et Dermatologie - Service de Dermatologie / Hôpital Civil	50.03 Dermato-Vénérologie
de BLAY de GAIX Frédéric	RP0 CS	• Pôle de Pathologie thoracique - Service de Pneumologie / Nouvel Hôpital Civil	51.01 Pneumologie
de SEZE Jérôme	NRP0 CS	• Pôle Tête et Cou - CETD - Centre d'Investigation Clinique (CIC) - AX5 / Hôpital de Haute-pierre	49.01 Neurologie
DEBRY Christian	RP0 CS	• Pôle Tête et Cou - CETD - Serv. d'Oto-rhino-laryngologie et de Chirurgie cervico-faciale / HP	55.01 Oto-rhino-laryngologie
DERUELLE Philippe	RP0 NCS	• Pôle de Gynécologie-Obstétrique - Service de Gynécologie-Obstétrique / Hôpital de Haute-pierre	54.03 Gynécologie-Obstétrique; gynécologie médicale: option gynécologie-obstétrique
Mme DOLLFUS-WALTMANN Héléne	NRP0 CS	• Pôle de Biologie - Service de Génétique Médicale / Hôpital de Haute-pierre	47.04 Génétique (type clinique)
EHLINGER Matthieu	NRP0 NCS	• Pôle de l'Appareil Locomoteur - Service d'Orthopédie-Traumatologie du membre inférieur / HP	50.02 Chirurgie Orthopédique et Traumatologique
Mme ENTZ-WERLE Natacha	NRP0 NCS	• Pôle médico-chirurgical de Pédiatrie - Service de Pédiatrie III / Hôpital de Haute-pierre	54.01 Pédiatrie
Mme FACCA Sybille	NRP0 CS	• Pôle de l'Appareil locomoteur - Service de Chirurgie de la Main - SOS Main / Hôpital de Haute-pierre	50.02 Chirurgie orthopédique et traumatologique
Mme FAFI-KREMER Samira	NRP0 CS	• Pôle de Biologie - Laboratoire (Institut) de Virologie / PTM HUS et Faculté	45.01 Bactériologie-Virologie ; Hygiène Hospitalière Option Bactériologie-Virologie biologique
FAITOT François	NRP0 NCS	• Pôle de Pathologie digestives, hépatiques et de la transplantation - Serv. de chirurgie générale, hépatique et endocrinienne et Transplantation / HP	53.02 Chirurgie générale
FALCOZ Pierre-Emmanuel	NRP0 NCS	• Pôle de Pathologie thoracique - Service de Chirurgie Thoracique / Nouvel Hôpital Civil	51.03 Chirurgie thoracique et cardio-vasculaire
FORNECKER Luc-Matthieu	NRP0 NCS	• Pôle d'Onco-Hématologie - Service d'hématologie / ICANS	47.01 Hématologie ; Transfusion Option : Hématologie
FOUCHER Jack	NRP0 NCS	• Pôle de Psychiatrie et de santé mentale - Service de Psychiatrie I / Hôpital Civil	49.03 Psychiatrie d'adultes
GALLIX Benoit	NCS	• IHU - Institut Hospitalo-Universitaire - Hôpital Civil	43.02 Radiologie et imagerie médicale
GANGI Afshin	RP0 CS	• Pôle d'Imagerie - Service d'Imagerie A interventionnelle / Nouvel Hôpital Civil	43.02 Radiologie et imagerie médicale (option clinique)
GARNON Julien	NRP0 NCS	• Pôle d'Imagerie - Service d'Imagerie A interventionnelle / Nouvel Hôpital Civil	43.02 Radiologie et imagerie médicale (option clinique)
GAUCHER David	NRP0 NCS	• Pôle des Spécialités Médicales - Ophthalmologie / SMO - Service d'Ophthalmologie / Nouvel Hôpital Civil	55.02 Ophthalmologie
GENY Bernard	NRP0 CS	• Pôle de Pathologie thoracique - Service de Physiologie et d'Explorations fonctionnelles / NHC	44.02 Physiologie (option biologique)
GEORG Yannick	NRP0 NCS	• Pôle d'activité médico-chirurgicale Cardio-vasculaire - Serv. de Chirurgie Vasculaire et de transplantation rénale / NHC	51.04 Chirurgie vasculaire ; médecine vasculaire/ Option : chirurgie vasculaire
GICQUEL Philippe	NRP0 CS	• Pôle médico-chirurgical de Pédiatrie - Service de Chirurgie Pédiatrique / Hôpital de Haute-pierre	54.02 Chirurgie infantile
GOICHOT Bernard	NRP0 CS	• Pôle de Médecine Interne, Rhumatologie, Nutrition, Endocrinologie, Diabétologie (MIRNED) - Service de Médecine interne et de nutrition / HP	54.04 Endocrinologie, diabète et maladies métaboliques
Mme GONZALEZ Maria	NRP0 CS	• Pôle de Santé publique et santé au travail - Service de Pathologie Professionnelle et Médecine du Travail/HC	46.02 Médecine et santé au travail

NOM et Prénoms	CS ²	Services Hospitaliers ou Institut / Localisation	Sous-section du Conseil National des Universités
GOTTENBERG Jacques-Eric	NRPô CS	• Pôle de Médecine Interne, Rhumatologie, Nutrition, Endocrinologie, Diabétologie (MIRNED) - Service de Rhumatologie / Hôpital Hautepierre	50.01 Rhumatologie
HANSMANN Yves	RPô NCS	• Pôle de Spécialités médicales - Ophtalmologie / SMO - Service des Maladies infectieuses et tropicales / NHC	45.03 Option : Maladies infectieuses
Mme HELMS Julie	NRPô NCS	• Pôle Urgences - Réanimations médicales / Centre antipoison - Service de Réanimation Médicale / Nouvel Hôpital Civil	48.02 Médecine Intensive-Réanimation
HIRSCH Edouard	NRPô NCS	• Pôle Tête et Cou - CETD - Service de Neurologie / Hôpital de Hautepierre	49.01 Neurologie
IMPERIALE Alessio	NRPô NCS	• Pôle d'Imagerie - Service de Médecine Nucléaire et Imagerie Moléculaire / ICANS	43.01 Biophysique et médecine nucléaire
ISNER-HOROBETI Marie-Eve	RPô CS	• Pôle de Médecine Physique et de Réadaptation - Institut Universitaire de Réadaptation / Clémenceau	49.05 Médecine Physique et Réadaptation
JAULHAC Benoît	NRPô CS	• Pôle de Biologie - Institut (Laboratoire) de Bactériologie / PTM HUS et Faculté	45.01 Option : Bactériologie -virologie (biologique)
Mme JEANDIER Nathalie	NRPô CS	• Pôle de Médecine Interne, Rhumatologie, Nutrition, Endocrinologie, Diabétologie (MIRNED) - Service d'Endocrinologie, diabète et nutrition / HC	54.04 Endocrinologie, diabète et maladies métaboliques
Mme JESEL-MOREL Laurence	NRPô NCS	• Pôle d'activité médico-chirurgicale Cardio-vasculaire - Service de Cardiologie / Nouvel Hôpital Civil	51.02 Cardiologie
KALTENBACH Georges	RPô CS	• Pôle de Gériatrie - Service de Médecine Interne - Gériatrie / Hôpital de la Robertsau - Secteur Evaluation - Gériatrie / Hôpital de la Robertsau	53.01 Option : gériatrie et biologie du vieillissement
Mme KESSLER Laurence	NRPô NCS	• Pôle de Médecine Interne, Rhumatologie, Nutrition, Endocrinologie, Diabétologie (MIRNED) - Service d'Endocrinologie, Diabète, Nutrition et Addictologie/ Méd. B / HC	54.04 Endocrinologie, diabète et maladies métaboliques
KESSLER Romain	NRPô NCS	• Pôle de Pathologie thoracique - Service de Pneumologie / Nouvel Hôpital Civil	51.01 Pneumologie
KINDO Michel	NRPô NCS	• Pôle d'activité médico-chirurgicale Cardio-vasculaire - Service de Chirurgie Cardio-vasculaire / Nouvel Hôpital Civil	51.03 Chirurgie thoracique et cardio-vasculaire
Mme KORGANOW Anne-Sophie	NRPô CS	• Pôle de Spécialités médicales - Ophtalmologie / SMO - Service de Médecine Interne et d'Immunologie Clinique / NHC	47.03 Immunologie (option clinique)
KREMER Stéphane	NRPô CS	• Pôle d'Imagerie - Service Imagerie II - Neuroradio Ostéoarticulaire - Pédiatrie / HP	43.02 Radiologie et imagerie médicale (option clinique)
KUHN Pierre	NRPô CS	• Pôle médico-chirurgical de Pédiatrie - Service de Néonatalogie et Réanimation néonatale (Pédiatrie II)/HP	54.01 Pédiatrie
KURTZ Jean-Emmanuel	RPô NCS	• Pôle d'Onco-Hématologie - Service d'hématologie / ICANS	47.02 Option : Cancérologie (clinique)
Mme LALANNE Laurence	NRPô CS	• Pôle de Psychiatrie, Santé mentale et Addictologie - Service d'Addictologie / Hôpital Civil	49.03 Psychiatrie d'adultes ; Addictologie (Option : Addictologie)
LANG Hervé	NRPô NCS	• Pôle de Chirurgie plastique reconstructrice et esthétique, Chirurgie maxillo-faciale, Morphologie et Dermatologie - Service de Chirurgie Urologique / Nouvel Hôpital Civil	52.04 Urologie
LAUGEL Vincent	RPô CS	• Pôle médico-chirurgical de Pédiatrie - Service de Pédiatrie 1 / Hôpital de Hautepierre	54.01 Pédiatrie
Mme LEJAY Anne	NRPô NCS	• Pôle d'activité médico-chirurgicale cardiovasculaire - Service de Chirurgie vasculaire et de Transplantation rénale / NHC	51.04 Option : Chirurgie vasculaire
LE MINOR Jean-Marie	NRPô NCS	• Pôle d'Imagerie - Institut d'Anatomie Normale / Faculté de Médecine - Service de Neuroradiologie, d'imagerie Ostéoarticulaire et interventionnelle/HP	42.01 Anatomie
LESSINGER Jean-Marc	RPô CS	• Pôle de Biologie - Laboratoire de Biochimie générale et spécialisée / LBGS / NHC - Laboratoire de Biochimie et de Biologie moléculaire / Hautepierre	82.00 Sciences Biologiques de Pharmacie
LIPSKER Dan	NRPô NCS	• Pôle de Chirurgie plastique reconstructrice et esthétique, Chirurgie maxillo-faciale, Morphologie et Dermatologie - Service de Dermatologie / Hôpital Civil	50.03 Dermato-vénérologie
LIVERNEAUX Philippe	RPô NCS	• Pôle de l'Appareil locomoteur - Service de Chirurgie de la Main - SOS Main / Hôpital de Hautepierre	50.02 Chirurgie orthopédique et traumatologique
MALOUF Gabriel	NRPô NCS	• Pôle d'Onco-hématologie - Service d'Oncologie médicale / ICANS	47.02 Cancérologie ; Radiothérapie Option : Cancérologie
MARTIN Thierry	NRPô NCS	• Pôle de Spécialités médicales - Ophtalmologie / SMO - Service de Médecine Interne et d'Immunologie Clinique / NHC	47.03 Immunologie (option clinique)
Mme MASCAUX Céline	NRPô NCS	• Pôle de Pathologie thoracique - Service de Pneumologie / Nouvel Hôpital Civil	51.01 Pneumologie ; Addictologie
Mme MATHELIN Carole	NRPô CS	• Pôle de Gynécologie-Obstétrique - Unité de Sénologie / ICANS	54.03 Gynécologie-Obstétrique ; Gynécologie Médicale
MAUVIEUX Laurent	NRPô CS	• Pôle d'Onco-Hématologie - Laboratoire d'Hématologie Biologique - Hôpital de Hautepierre - Institut d'Hématologie / Faculté de Médecine	47.01 Hématologie ; Transfusion Option Hématologie Biologique

NOM et Prénoms	CS ²	Services Hospitaliers ou Institut / Localisation	Sous-section du Conseil National des Universités
MAZZUCOTELLI Jean-Philippe	NRPô CS	• Pôle d'activité médico-chirurgicale Cardio-vasculaire - Service de Chirurgie Cardio-vasculaire / Nouvel Hôpital Civil	51.03 Chirurgie thoracique et cardio-vasculaire
MENARD Didier	NRPô NCS	• Pôle de Biologie - Laboratoire de Parasitologie et de Mycologie médicale/PTM HUS	45.02 Parasitologie et mycologie (option biologique)
MERTES Paul-Michel	RPô CS	• Pôle d'Anesthésiologie / Réanimations chirurgicales / SAMU-SMUR - Service d'Anesthésiologie-Réanimation chirurgicale / NHC	48.01 Option : Anesthésiologie-Réanimation (type mixte)
MEYER Alain	NRPô NCS	• Institut de Physiologie / Faculté de Médecine • Pôle de Pathologie thoracique - Service de Physiologie et d'Explorations fonctionnelles / NHC	44.02 Physiologie (option biologique)
MEYER Nicolas	NRPô NCS	• Pôle de Santé publique et Santé au travail - Laboratoire de Biostatistiques / Hôpital Civil • Biostatistiques et Informatique / Faculté de médecine / Hôpital Civil	46.04 Biostatistiques, Informatique Médicale et Technologies de Communication (option biologique)
MEZIANI Ferhat	NRPô CS	• Pôle Urgences - Réanimations médicales / Centre antipoison - Service de Réanimation Médicale / Nouvel Hôpital Civil	48.02 Réanimation
MONASSIER Laurent	NRPô CS	• Pôle de Pharmacie-pharmacologie - Labo. de Neurobiologie et Pharmacologie cardio-vasculaire- EA7295/ Fac	48.03 Option : Pharmacologie fondamentale
MOREL Olivier	NRPô NCS	• Pôle d'activité médico-chirurgicale Cardio-vasculaire - Service de Cardiologie / Nouvel Hôpital Civil	51.02 Cardiologie
MUTTER Didier	RPô NCS	• Pôle Hépatogastro-digestif de l'Hôpital Civil - Service de Chirurgie Viscérale et Digestive / NHC	52.02 Chirurgie digestive
NAMER Izzie Jacques	NRPô CS	• Pôle d'Imagerie - Service de Médecine Nucléaire et Imagerie Moléculaire / ICANS	43.01 Biophysique et médecine nucléaire
NOEL Georges	NRPô NCS	• Pôle d'Imagerie - Service de radiothérapie / ICANS	47.02 Cancérologie ; Radiothérapie Option Radiothérapie biologique
NOLL Eric	NRPô NCS	• Pôle d'Anesthésie Réanimation Chirurgicale SAMU-SMUR - Service Anesthésiologie et de Réanimation Chirurgicale - HP	48.01 Anesthésiologie-Réanimation
OHANA Mickael	NRPô NCS	• Pôle d'Imagerie - Service d'Imagerie B - Imagerie viscérale et cardio-vasculaire / NHC	43.02 Radiologie et imagerie médicale (option clinique)
OHLMANN Patrick	RPô CS	• Pôle d'activité médico-chirurgicale Cardio-vasculaire - Service de Cardiologie / Nouvel Hôpital Civil	51.02 Cardiologie
Mme OLLAND Anne	NRPô NCS	• Pôle de Pathologie Thoracique - Service de Chirurgie thoracique / Nouvel Hôpital Civil	51.03 Chirurgie thoracique et cardio-vasculaire
Mme PAILLARD Catherine	NRPô CS	• Pôle médico-chirurgicale de Pédiatrie - Service de Pédiatrie III / Hôpital de Haute-pierre	54.01 Pédiatrie
RELACCIA Thierry	NRPô NCS	• Pôle d'Anesthésie / Réanimation chirurgicales / SAMU-SMUR - Centre de formation et de recherche en pédagogie des sciences de la santé / Faculté	48.05 Réanimation ; Médecine d'urgence Option : Médecine d'urgences
Mme PERRETTA Silvana	NRPô NCS	• Pôle Hépatogastro-digestif de l'Hôpital Civil - Service de Chirurgie Viscérale et Digestive / Nouvel Hôpital Civil	52.02 Chirurgie digestive
PESSAUX Patrick	NRPô CS	• Pôle des Pathologies digestives, hépatiques et de la transplantation - Service de Chirurgie Viscérale et Digestive / Nouvel Hôpital Civil	52.02 Chirurgie Digestive
PETIT Thierry	CDp	• ICANS - Département de médecine oncologique	47.02 Cancérologie ; Radiothérapie Option : Cancérologie Clinique
PIVOT Xavier	NRPô NCS	• ICANS - Département de médecine oncologique	47.02 Cancérologie ; Radiothérapie Option : Cancérologie Clinique
POTTECHER Julien	NRPô CS	• Pôle d'Anesthésie / Réanimations chirurgicales / SAMU-SMUR - Service d'Anesthésie et de Réanimation Chirurgicale / Haute-pierre	48.01 Anesthésiologie-réanimation ; Médecine d'urgence (option clinique)
PRADIGNAC Alain	NRPô NCS	• Pôle de Médecine Interne, Rhumatologie, Nutrition, Endocrinologie, Diabétologie (MIRNED) - Service de Médecine Interne et nutrition / Hôpital de Haute-pierre	44.04 Nutrition
PROUST François	NRPô CS	• Pôle Tête et Cou - Service de Neurochirurgie / Hôpital de Haute-pierre	49.02 Neurochirurgie
RAUL Jean-Sébastien	NRPô CS	• Pôle de Biologie - Service de Médecine Légale, Consultation d'Urgences médico-judiciaires et Laboratoire de Toxicologie / Faculté et NHC • Institut de Médecine Légale / Faculté de Médecine	46.03 Médecine Légale et droit de la santé
REIMUND Jean-Marie	NRPô NCS	• Pôle des Pathologies digestives, hépatiques et de la transplantation - Service d'Hépatogastro-Entérologie et d'Assistance Nutritive / HP	52.01 Option : Gastro-entérologie
RICCI Roméo	NRPô NCS	• Pôle de Biologie - Département Biologie du développement et cellules souches / IGBMC	44.01 Biochimie et biologie moléculaire
ROHR Serge	NRPô CS	• Pôle des Pathologies digestives, hépatiques et de la transplantation - Service de Chirurgie générale et Digestive / HP	53.02 Chirurgie générale
ROMAIN Benoît	NRPô NCS	• Pôle des Pathologies digestives, hépatiques et de la transplantation - Service de Chirurgie générale et Digestive / HP	53.02 Chirurgie générale
Mme ROSSIGNOL-BERNARD Sylvie	NRPô NCS	• Pôle médico-chirurgicale de Pédiatrie - Service de Pédiatrie I / Hôpital de Haute-pierre	54.01 Pédiatrie
Mme ROY Catherine	NRPô CS	• Pôle d'Imagerie - Service d'Imagerie B - Imagerie viscérale et cardio-vasculaire / NHC	43.02 Radiologie et imagerie médicale (opt. clinique)
SANANES Nicolas	NRPô NCS	• Pôle de Gynécologie-Obstétrique - Service de Gynécologie-Obstétrique / HP	54.03 Gynécologie-Obstétrique ; gynécologie médicale Option : Gynécologie-Obstétrique

NOM et Prénoms	CS*	Services Hospitaliers ou Institut / Localisation	Sous-section du Conseil National des Universités
SAUER Arnaud	NRPô NCS	• Pôle de Spécialités médicales - Ophtalmologie / SMO - Service d'Ophtalmologie / Nouvel Hôpital Civil	55.02 Ophtalmologie
SAULEAU Erik-André	NRPô NCS	• Pôle de Santé publique et Santé au travail - Service de Santé Publique / Hôpital Civil • Biostatistiques et Informatique / Faculté de médecine / HC	46.04 Biostatistiques, Informatique médicale et Technologies de Communication (option biologique)
SAUSSINE Christian	RPô CS	• Pôle d'Urologie, Morphologie et Dermatologie - Service de Chirurgie Urologique / Nouvel Hôpital Civil	52.04 Urologie
Mme SCHATZ Claude	NRPô CS	• Pôle de Spécialités médicales - Ophtalmologie / SMO - Service d'Ophtalmologie / Nouvel Hôpital Civil	55.02 Ophtalmologie
Mme SCHLUTH-BOLARD Caroline	NRPô NCS	• Pôle de Biologie - Laboratoire de Diagnostic Génétique / Nouvel Hôpital Civil	47.04 Génétique (option biologique)
SCHNEIDER Francis	NRPô CS	• Pôle Urgences - Réanimations médicales / Centre antipoison - Service de Réanimation médicale / Hôpital de Haute-pierre	48.02 Réanimation
Mme SCHRÖDER Carmen	NRPô CS	• Pôle de Psychiatrie et de santé mentale - Service de Psychothérapie pour Enfants et Adolescents / HC	49.04 Pédopsychiatrie ; Addictologie
SCHULTZ Philippe	NRPô NCS	• Pôle Tête et Cou - CETD - Service d'Oto-rhino-laryngologie et de Chirurgie cervico-faciale / HP	55.01 Oto-rhino-laryngologie
SERFATY Lawrence	NRPô CS	• Pôle des Pathologies digestives, hépatiques et de la transplantation - Service d'Hépatogastro-Entérologie et d'Assistance Nutritive/HP	52.01 Gastro-entérologie ; Hépatologie ; Addictologie Option : Hépatologie
SIBILIA Jean	NRPô NCS	• Pôle de Médecine Interne, Rhumatologie, Nutrition, Endocrinologie, Diabétologie (MIRNED) - Service de Rhumatologie / Hôpital de Haute-pierre	50.01 Rhumatologie
STEPHAN Dominique	NRPô CS	• Pôle d'activité médico-chirurgicale Cardio-vasculaire - Service des Maladies vasculaires-HTA-Pharmacologie clinique/NHC	51.04 Option : Médecine vasculaire
Mme TALON Isabelle	NRPô NCS	• Pôle médico-chirurgical de Pédiatrie - Service de Chirurgie Pédiatrique / Hôpital de Haute-pierre	54.02 Chirurgie infantile
TELETIN Marius	NRPô NCS	• Pôle de Biologie - Service de Biologie de la Reproduction / CMCO Schiltigheim	54.05 Biologie et médecine du développement et de la reproduction (option biologique)
Mme TRANCHANT Christine	NRPô CS	• Pôle Tête et Cou - CETD - Service de Neurologie / Hôpital de Haute-pierre	49.01 Neurologie
VEILLON Francis	NRPô CS	• Pôle d'Imagerie - Service d'Imagerie 1 - Imagerie viscérale, ORL et mammaire / HP	43.02 Radiologie et imagerie médicale (option clinique)
VELTEN Michel	NRPô NCS	• Pôle de Santé publique et Santé au travail - Département de Santé Publique / Secteur 3 - Epidémiologie et Economie de la Santé / Hôpital Civil • Laboratoire d'Epidémiologie et de santé publique / HC / Faculté	46.01 Epidémiologie, économie de la santé et prévention (option biologique)
VIDALHET Pierre	NRPô CS	• Pôle de Psychiatrie et de santé mentale - Service de Psychiatrie d'Urgences, de liaison et de Psychotraumatologie / Hôpital Civil	49.03 Psychiatrie d'adultes
VIVILLE Stéphane	NRPô NCS	• Pôle de Biologie - Laboratoire de Parasitologie et de Pathologies tropicales / Faculté	54.05 Biologie et médecine du développement et de la reproduction (option biologique)
VOGEL Thomas	NRPô CS	• Pôle de Gériatrie - Service de soins de suite et réadaptation gériatrique/Hôpital de la Robertsau	51.01 Option : Gériatrie et biologie du vieillissement
WEBER Jean-Christophe Pierre	NRPô CS	• Pôle de Spécialités médicales - Ophtalmologie / SMO - Service de Médecine Interne / Nouvel Hôpital Civil	53.01 Option : Médecine Interne
wOLF Philippe	NRPô NCS	• Pôle des Pathologies digestives, hépatiques et de la transplantation - Service de Chirurgie Générale et de Transplantations multiorganes / HP - Coordonnateur des activités de prélèvements et transplantations des HU	53.02 Chirurgie générale
Mme WOLFF Valérie	NRPô CS	• Pôle Tête et Cou - Unité Neurovasculaire / Hôpital de Haute-pierre	49.01 Neurologie

HC : Hôpital Civil - HP : Hôpital de Haute-pierre - NHC : Nouvel Hôpital Civil - PTM = Plateau technique de microbiologie

* : CS (Chef de service) ou NCS (Non Chef de service hospitalier) - Cspi : Chef de service par intérim - CSp : Chef de service provisoire (un an)

CU : Chef d'unité fonctionnelle

Pô : Pôle RPô (Responsable de Pôle) ou NRPô (Non Responsable de Pôle)

Cons. : Consultanat hospitalier (poursuite des fonctions hospitalières sans chefferie de service)

Dir : Directeur

A4 – PROFESSEUR ASSOCIÉ DES UNIVERSITÉS

NOM et Prénoms	CS*	Services Hospitaliers ou Institut / Localisation	Sous-section du Conseil National des Universités
CALVEL Laurent	NRPô CS	• Pôle Spécialités médicales - Ophtalmologie / SMO - Service de Soins palliatifs / NHC	46.05 Médecine palliative
HABERSETZER François	CS	• Pôle Hépatogastro-digestif - Service de Gastro-Entérologie - NHC	52.02 Gastro-Entérologie
SALVAT Eric	CS	• Pôle Tête-Cou - Centre d'Evaluation et de Traitement de la Douleur / HP	48.04 Thérapeutique, Médecine de la douleur, Addictologie

B1 - MAITRES DE CONFÉRENCES DES UNIVERSITÉS - PRATICIENS HOSPITALIERS (MCU-PH)

NOM et Prénoms	CS ²	Services Hospitaliers ou Institut / Localisation	Sous-section du Conseil National des Universités
AGIN Arnaud		• Pôle d'Imagerie - Service de Médecine nucléaire et Imagerie Moléculaire / ICANS	43.01 Biophysique et Médecine nucléaire
Mme AYME-DIETRICH Estelle		• Pôle de Pharmacologie - Unité de Pharmacologie clinique / Faculté de Médecine	48.03 Pharmacologie fondamentale ; pharmacologie clinique ; addictologie Option : pharmacologie fondamentale
BAHOUGNE Thibault		• Pôle de Médecine Interne, Rhumatologie, Nutrition, Endocrinologie, Diabétologie (MIRNED) - Service d'Endocrinologie, Diabète et Maladies métaboliques / HC	53.01 Option : médecine Interne
BECKER Guillaume		• Pôle de Pharmacologie - Unité de Pharmacologie clinique / Faculté de Médecine	48.03 Pharmacologie fondamentale ; pharmacologie clinique ; addictologie
BENOTMANE Ilies		• Pôle de Spécialités médicales-Ophthalmologie / SMO - Service de Néphrologie-Transplantation / NHC	52.03 Néphrologie
Mme BIANCALANA Valérie		• Pôle de Biologie - Laboratoire de Diagnostic Génétique / Nouvel Hôpital Civil	47.04 Génétique (option biologique)
BLONDET Cyrille		• Pôle d'Imagerie - Service de Médecine nucléaire et Imagerie Moléculaire / ICANS	43.01 Biophysique et médecine nucléaire (option clinique)
Mme BOICHARD Amélie		• Pôle de Biologie - Laboratoire de Biochimie et de Biologie moléculaire / HP	44.01 Biochimie et biologie moléculaire
BOUSIGES Olivier		• Pôle de Biologie - Laboratoire de Biochimie et de Biologie moléculaire / HP	44.01 Biochimie et biologie moléculaire
BOYER Pierre		• Pôle de Biologie - Institut de Bactériologie / Faculté de Médecine	45.01 Bactériologie- Virologie ; Hygiène Hospitalière Option Bactériologie- Virologie biologique
Mme BRU Valérie		• Pôle de Biologie - Laboratoire de Parasitologie et de Mycologie médicale/PTM HUS • Institut de Parasitologie / Faculté de Médecine	45.02 Parasitologie et mycologie (option biologique)
Mme BUND Caroline		• Pôle d'Imagerie - Service de médecine nucléaire et imagerie moléculaire / ICANS	43.01 Biophysique et médecine nucléaire
CARAPITO Raphaël		• Pôle de Biologie - Laboratoire d'Immunologie biologique / Nouvel Hôpital Civil	47.03 Immunologie
CAZZATO Roberto		• Pôle d'Imagerie - Service d'Imagerie A interventionnelle / NHC	43.02 Radiologie et imagerie médicale (option clinique)
CERALINE Jocelyn		• Pôle de Biologie - Département de Biologie structurale Intégrative / IGBMC	47.02 Cancérologie ; Radiothérapie (option biologique)
CHERRIER Thomas		• Pôle de Biologie - Laboratoire d'Immunologie biologique / Nouvel Hôpital Civil	47.03 Immunologie (option biologique)
CHOQUET Philippe		• Pôle d'Imagerie - UF6237 - Imagerie Préclinique / HP	43.01 Biophysique et médecine nucléaire
CLERE-JEHL Raphaël		• Pôle Urgences - Réanimations médicales / Centre antipoison - Service de Réanimation médicale / Hôpital de Hautepierre	48.02 Réanimation
Mme CORDEANU Elena Mihaela		• Pôle d'activité médico-chirurgicale Cardio-vasculaire - Service des Maladies vasculaires-HTA-Pharmacologie clinique / NHC	51.04 Option : Médecine vasculaire
DALI-YOUCHEF Ahmed Nassim		• Pôle de Biologie - Laboratoire de Biochimie et Biologie moléculaire / NHC	44.01 Biochimie et biologie moléculaire
DANION François		• Pôle de Spécialités médicales - Ophthalmologie / SMO - Service des Maladies infectieuses et tropicales / NHC	45.03 Option : Maladies infectieuses
DEVYS Didier		• Pôle de Biologie - Laboratoire de Diagnostic génétique / Nouvel Hôpital Civil	47.04 Génétique (option biologique)
Mme DINKELACKER Véra		• Pôle Tête et Cou - CETD - Service de Neurologie / Hôpital de Hautepierre	49.01 Neurologie
DOLLÉ Pascal		• Pôle de Biologie - Laboratoire de Biochimie et biologie moléculaire / NHC	44.01 Biochimie et biologie moléculaire
Mme ENACHE Irina		• Pôle de Pathologie thoracique - Service de Physiologie et d'Explorations fonctionnelles / IGBMC	44.02 Physiologie
Mme FARRUGIA-JACAMON Audrey		• Pôle de Biologie - Service de Médecine Légale, Consultation d'Urgences médico-judiciaires et Laboratoire de Toxicologie / Faculté et HC • Institut de Médecine Légale / Faculté de Médecine	46.03 Médecine Légale et droit de la santé
FELTEN Renaud		• Pôle Tête et Cou - CETD - Centre d'Investigation Clinique (CIC) - AX5 / Hôpital de Hautepierre	48.04 Thérapeutique, Médecine de la douleur, Addictologie
FILISSETTI Denis	CS	• Pôle de Biologie - Labo. de Parasitologie et de Mycologie médicale / PTM HUS et Faculté	45.02 Parasitologie et mycologie (option biologique)
GANTNER Pierre		• Pôle de Biologie - Laboratoire (Institut) de Virologie / PTM HUS et Faculté	45.01 Bactériologie- Virologie ; Hygiène Hospitalière Option Bactériologie- Virologie biologique
GIANNINI Margherita		• Pôle de Pathologie thoracique - Service de Physiologie et d'Explorations fonctionnelles / NHC	44.02 Physiologie (option biologique)
GIES Vincent		• Pôle de Spécialités médicales - Ophthalmologie / SMO - Service de Médecine Interne et d'Immunologie Clinique / NHC	47.03 Immunologie (option clinique)
GRILLON Antoine		• Pôle de Biologie - Institut (Laboratoire) de Bactériologie / PTM HUS et Faculté	45.01 Option : Bactériologie -virologie (biologique)

NOM et Prénoms	CS ²	Services Hospitaliers ou Institut / Localisation	Sous-section du Conseil National des Universités
GUERIN Eric		• Pôle de Biologie - Laboratoire de Biochimie et de Biologie moléculaire / HP	44.03 Biologie cellulaire (option biologique)
GUFFROY Aurélien		• Pôle de Spécialités médicales - Ophtalmologie / SMO - Service de Médecine interne et d'Immunologie clinique / NHC	47.03 Immunologie (option clinique)
Mme HARSAN-RASTEI Laura		• Pôle d'Imagerie - Service de Médecine Nucléaire et Imagerie Moléculaire / ICANS	43.01 Biophysique et médecine nucléaire
HUBELE Fabrice		• Pôle d'Imagerie - Service de Médecine nucléaire et Imagerie Moléculaire / ICANS - Service de Biophysique et de Médecine Nucléaire / NHC	43.01 Biophysique et médecine nucléaire
KASTNER Philippe		• Pôle de Biologie - Département Génomique fonctionnelle et cancer / IGBMC	47.04 Génétique (option biologique)
Mme KEMMEL Véronique		• Pôle de Biologie - Laboratoire de Biochimie et de Biologie moléculaire / HP	44.01 Biochimie et biologie moléculaire
KOCH Guillaume		- Institut d'Anatomie Normale / Faculté de Médecine	42.01 Anatomie (Option clinique)
Mme KRASNY-PACINI Agata		• Pôle de Médecine Physique et de Réadaptation - Institut Universitaire de Réadaptation / Clémenceau	49.05 Médecine Physique et Réadaptation
Mme LAMOUR Valérie		• Pôle de Biologie - Laboratoire de Biochimie et de Biologie moléculaire / HP	44.01 Biochimie et biologie moléculaire
Mme LANNES Béatrice		• Institut d'Histologie / Faculté de Médecine • Pôle de Biologie - Service de Pathologie / Hôpital de Hautepierre	42.02 Histologie, Embryologie et Cytogénétique (option biologique)
LAVAUZ Thomas		• Pôle de Biologie - Laboratoire de Biochimie et de Biologie moléculaire / HP	44.03 Biologie cellulaire
LECOINTRE Lise		• Pôle de Gynécologie-Obstétrique - Service de Gynécologie-Obstétrique / Hôpital de Hautepierre	54.03 Gynécologie-Obstétrique ; gynécologie médicale Option : Gynécologie-obstétrique
LENORMAND Cédric		• Pôle de Chirurgie maxillo-faciale, Morphologie et Dermatologie - Service de Dermatologie / Hôpital Civil	50.03 Dermato-Vénérologie
LHERMITTE Benoît		• Pôle de Biologie - Service de Pathologie / Hôpital de Hautepierre	42.03 Anatomie et cytologie pathologiques
LUTZ Jean-Christophe		• Pôle de Chirurgie plastique reconstructrice et esthétique, Chirurgie maxillo-faciale, Morphologie et Dermatologie - Service de Chirurgie Plastique et Maxillo-faciale / Hôpital Civil	55.03 Chirurgie maxillo-faciale et stomatologie
MIGUET Laurent		• Pôle de Biologie - Laboratoire d'Hématologie biologique / Hôpital de Hautepierre et NHC	44.03 Biologie cellulaire (type mixte : biologique)
Mme MOUTOU Céline ép. GUNTHNER	CS	• Pôle de Biologie - Laboratoire de Diagnostic préimplantatoire / CCMO Schiltigheim	54.05 Biologie et médecine du développement et de la reproduction (option biologique)
MULLER Jean		• Pôle de Biologie - Laboratoire de Diagnostic génétique / Nouvel Hôpital Civil	47.04 Génétique (option biologique)
Mme NICOLAE Alina		• Pôle de Biologie - Service de Pathologie / Hôpital de Hautepierre	42.03 Anatomie et Cytologie Pathologiques (Option Clinique)
Mme NOURRY Nathalie		• Pôle de Santé publique et Santé au travail - Service de Pathologie professionnelle et de Médecine du travail / HC	46.02 Médecine et Santé au Travail (option clinique)
PFUFF Alexander		• Pôle de Biologie - Laboratoire de Parasitologie et de Mycologie médicale /PTM HUS	45.02 Parasitologie et mycologie
Mme PITON Amélie		• Pôle de Biologie - Laboratoire de Diagnostic génétique / NHC	47.04 Génétique (option biologique)
POP Raoul		• Pôle d'Imagerie - Unité de Neuroradiologie interventionnelle / Hôpital de Hautepierre	43.02 Radiologie et imagerie médicale (option clinique)
PREVOST Gilles		• Pôle de Biologie - Institut (Laboratoire) de Bactériologie / PTM HUS et Faculté	45.01 Option : Bactériologie -virologie (biologique)
Mme RADOSAVLJEVIC Mirjana		• Pôle de Biologie - Laboratoire d'Immunologie biologique / Nouvel Hôpital Civil	47.03 Immunologie (option biologique)
Mme REIX Nathalie		• Pôle de Biologie - Laboratoire de Biochimie et Biologie moléculaire / NHC - Service de Chirurgie / ICANS	43.01 Biophysique et médecine nucléaire
Mme RIOU Marianne		• Pôle de Pathologie thoracique - Service de Physiologie et explorations fonctionnelles / NHC	44.02 Physiologie (option clinique)
Mme ROLLAND Delphine		• Pôle de Biologie - Laboratoire d'Hématologie biologique / Hôpital de Hautepierre	47.01 Hématologie ; transfusion (type mixte : Hématologie)
Mme ROLLING Julie		• Pôle de Psychiatrie et de santé mentale - Service Psychothérapeutique pour Enfants et Adolescents / HC	49.04 Pédopsychiatrie ; Addictologie
Mme RUPPERT Elisabeth		• Pôle Tête et Cou - Service de Neurologie - Unité de Pathologie du Sommeil / HC	49.01 Neurologie
Mme SABOU Alina		• Pôle de Biologie - Laboratoire de Parasitologie et de Mycologie médicale/PTM HUS - Institut de Parasitologie / Faculté de Médecine	45.02 Parasitologie et mycologie (option biologique)
SAVIANO Antonio		• Pôle des Pathologies digestives, hépatiques et de la transplantation - Service d'Hépatogastro-Entérologie /HP	52.01 Gastro-entérologie ; Hépatologie ; Addictologie
Mme SCHEIDECKER Sophie		• Pôle de Biologie - Laboratoire de Diagnostic génétique / Nouvel Hôpital Civil	47.04 Génétique

NOM et Prénoms	CS ²	Services Hospitaliers ou Institut / Localisation	Sous-section du Conseil National des Universités
SCHRAMM Frédéric		• Pôle de Biologie - Institut (Laboratoire) de Bactériologie / PTM HUS et Faculté	45.01 Option : Bactériologie-virologie (biologique)
Mme SOLIS Morgane		• Pôle de Biologie - Laboratoire de Virologie / Hôpital de Hautepierre	45.01 Bactériologie-Virologie ; hygiène hospitalière Option : Bactériologie-Virologie
Mme SORDET Christelle		• Pôle de Médecine Interne, Rhumatologie, Nutrition, Endocrinologie, Diabétologie (MIRNED) - Service de Rhumatologie / Hôpital de Hautepierre	50.01 Rhumatologie
Mme TALAGRAND-REBOUL Emilie		• Pôle de Biologie - Institut (Laboratoire) de Bactériologie / PTM HUS et Faculté	45.01 Option : Bactériologie-virologie (biologique)
VALLAT Laurent		• Pôle de Biologie - Laboratoire d'Immunologie Biologique - Hôpital de Hautepierre	47.01 Hématologie ; Transfusion Option Hématologie Biologique
Mme VELAY-RUSCH Aurélie		• Pôle de Biologie - Laboratoire de Virologie / Hôpital Civil	45.01 Bactériologie- Virologie ; Hygiène Hospitalière Option Bactériologie- Virologie biologique
Mme VILLARD Odile		• Pôle de Biologie - Labo. de Parasitologie et de Mycologie médicale / PTM HUS et Fac	45.02 Parasitologie et mycologie (option biologique)
Mme ZALOSZYC Ariane ép. MARCANTONI		• Pôle Médico-Chirurgical de Pédiatrie - Service de Pédiatrie I / Hôpital de Hautepierre	54.01 Pédiatrie
ZOLL Joffrey		• Pôle de Pathologie thoracique - Service de Physiologie et d'Explorations fonctionnelles / HC	44.02 Physiologie (option clinique)

B2 – PROFESSEURS DES UNIVERSITÉS (monoappartenant)

Pr BONAHE Christian P0166	Laboratoire d'Epistémologie des Sciences de la Vie et de la Santé (LESVS) Institut d'Anatomie Pathologique	72.	Epistémologie - Histoire des sciences et des Techniques
---------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----	---------------------------------------------------------

B3 - MAITRES DE CONFÉRENCES DES UNIVERSITÉS (monoappartenant)

Mme CHABRAN Elena	ICUBE-UMR 7357 - Equipe IMIS / Faculté de Médecine	69.	Neurosciences
M. DILLESEGER Jean-Philippe	ICUBE-UMR 7357 - Equipe IMIS / Faculté de Médecine	69.	Neurosciences
Mr KESSEL Nils	Laboratoire d'Epistémologie des Sciences de la Vie et de la Santé (LESVS) Institut d'Anatomie Pathologique	72.	Epistémologie - Histoire des sciences et des Techniques
Mr LANDRE Lionel	ICUBE-UMR 7357 - Equipe IMIS / Faculté de Médecine	69.	Neurosciences
Mme MIRALLES Célia	Laboratoire d'Epistémologie des Sciences de la Vie et de la Santé (LESVS) Institut d'Anatomie Pathologique	72.	Epistémologie - Histoire des sciences et des Techniques
Mme SCARFONE Marianna	Laboratoire d'Epistémologie des Sciences de la Vie et de la Santé (LESVS) Institut d'Anatomie Pathologique	72.	Epistémologie - Histoire des sciences et des Techniques
Mme THOMAS Marion	Laboratoire d'Epistémologie des Sciences de la Vie et de la Santé (LESVS) Institut d'Anatomie Pathologique	72.	Epistémologie - Histoire des sciences et des Techniques
Mr VAGNERON Frédéric	Laboratoire d'Epistémologie des Sciences de la Vie et de la Santé (LESVS) Institut d'Anatomie Pathologique	72.	Epistémologie - Histoire des sciences et des Techniques
Mr ZIMMER Alexis	Laboratoire d'Epistémologie des Sciences de la Vie et de la Santé (LESVS) Institut d'Anatomie Pathologique	72.	Epistémologie - Histoire des sciences et des Techniques

C - ENSEIGNANTS ASSOCIÉS DE MÉDECINE GÉNÉRALE

C1 - PROFESSEURS ASSOCIÉS DES UNIVERSITÉS DE MÉDECINE GÉNÉRALE (mi-temps)

Pre Ass. DUMAS Claire
Pre Ass. GROB-BERTHOU Anne
Pr Ass. GUILLOU Philippe
Pr Ass. HILD Philippe
Pr Ass. ROUGERIE Fabien

C2 - MAITRE DE CONFÉRENCES DES UNIVERSITÉS DE MÉDECINE GÉNÉRALE - TITULAIRE

Dre CHAMBE Juliette
Dr LORENZO Mathieu

C3 - MAITRES DE CONFÉRENCES ASSOCIÉS DES UNIVERSITÉS DE MÉDECINE GÉNÉRALE (mi-temps)

Dr DELACOUR Chloé
Dr GIACOMINI Antoine
Dr HERZOG Florent
Dr HOLLANDER David
Dre SANSELMÉ Anne-Elisabeth
Dr SCHMITT Yannick

E - PRATICIENS HOSPITALIERS - CHEFS DE SERVICE NON UNIVERSITAIRES

Mme la Dre DARIUS Sophie	- Permanence d'accès aux soins de santé - La Boussole (PASS) / Hôpital Civil
Mme Dre GOURIEUX Bénédicte	• Pôle de Pharmacie-pharmacologie - Service de Pharmacie-Stérilisation / Nouvel Hôpital Civil
Dre GUILBERT Anne-Sophie	• Pôle médico-chirurgical de Pédiatrie - Service de Réanimation pédiatrique spécialisée et de surveillance continue / HP
Dr LEFEBVRE Nicolas	• Pôle de Spécialités Médicales - Ophtalmologie - Hygiène (SMO) - Service des Maladies Infectieuses et Tropicales / Nouvel Hôpital Civil
Dr LEPAGE Tristan	- USN1 (UF9317) – Unité Médicale de la Maison d'arrêt de Strasbourg
Mme la Dre LICHTBLAU Isabelle	• Pôle de Gynécologie et d'Obstétrique - Laboratoire de Biologie de la Reproduction
Dr NISAND Gabriel	• Pôle de Santé Publique et Santé au travail - Service de Santé Publique - DIM / Hôpital Civil
Dr PIRRELLO Olivier	• Pôle de Gynécologie et d'Obstétrique - Service de Gynécologie-Obstétrique / CMCO
Dr REY David	• Pôle de Spécialités médicales - Ophtalmologie / SMO - «Le trait d'union» - Centre de soins de l'infection par le VIH / Nouvel Hôpital Civil
Mme Dre RONDE OUSTEAU Cécile	• Pôle Locomax - Service de Chirurgie Séptique / Hôpital de Hautepierre
Mme Dre RONGIERES Catherine	• Pôle de Gynécologie et d'Obstétrique - Centre Clinico Biologique d'Assistance Médicale à la Procréation / CMCO
Dr TCHOMAKOV Dimitar	• Pôle Médico-Chirurgical de Pédiatrie - Service des Urgences Médico-Chirurgicales pédiatriques / Hôpital de Hautepierre
Dr WAECHTER Cédric	• Pôle de Gériatrie - Service de Soins de suite de Longue Durée et d'hébergement gériatrique / EHPAD / Robertsau
Mme Dre WEISS Anne	• Pôle Urgences - SAMU67 - Médecine Intensive et Réanimation - SAMU

F1 - PROFESSEURS ÉMÉRITES

- o **de droit et à vie** (*membre de l'Institut*)
 - CHAMBON Pierre (Biochimie et biologie moléculaire)
 - MANDEL Jean-Louis (Génétique et biologie moléculaire et cellulaire)
- o **pour trois ans (1er septembre 2020 au 31 août 2023)**
 - BELLOCQ Jean-Pierre (Service de Pathologie)
 - DANION Jean-Marie (Psychiatrie)
 - KOPFERSCHMITT Jacques (Urgences médico-chirurgicales Adultes)
 - MULLER André (Centre d'Evaluation et de Traitement de la Douleur)
- o **pour trois ans (1er septembre 2021 au 31 août 2024)**
 - DANION Anne (Pédopsychiatrie, addictologie)
 - DIEMUNSCH Pierre (Anesthésiologie et Réanimation chirurgicale)
 - HERBRECHT Raoul (Hématologie)
 - STEIB Jean-Paul (Chirurgie du rachis)
- o **pour trois ans (1er septembre 2022 au 31 août 2025)**
 - Mme QUOIX Elisabeth (Pneumologie)
- o **pour cinq ans (1er septembre 2023 au 31 août 2028)**
 - CHRISTMANN Daniel (Maladies infectieuses et tropicales)
 - GRUCKER Daniel (Physique biologique)
 - HANNEDOUCHE Thierry (Néphrologie)
 - KEMPF Jean-François (Chirurgie orthopédique et de la main)
 - MOULIN Bruno (Néphrologie)
 - PINGET Michel (Endocrinologie)
 - ROGUE Patrick (Biochimie et Biologie moléculaire)
 - ROUL Gérald (Cardiologie)

F2 - PROFESSEUR des UNIVERSITÉS ASSOCIÉ (mi-temps)

M. SOLER Luc CNU-31 IRCAD

F3 - PROFESSEURS CONVENTIONNÉS DE L'UNIVERSITÉ

Pr DETAPPE Alexandre	47-02
Pre LAMOUILLE-CHEVALIER Catherine	46-05
Pr LECOCQ Jehan	49-05
Pr MASTELLI Antoine	49-03
Pr MATSUSHITA Kensuke	51-02
Pr REIS Jacques	49-01
Pre RONGIERES Catherine	54-03
Pre SEELIGER Barbara	52-02

G1 - PROFESSEURS HONORAIRES

ADLOFF Michel (Chirurgie digestive) / 01.09.94	KUNTZMANN Francis (Gériatrie) / 01.09.07
BALDAUF Jean-Jacques (Gynécologie obstétrique) / 01.09.21	KURTZ Daniel (Neurologie) / 01.09.98
BAREISS Pierre (Cardiologie) / 01.09.12	LANG Gabriel (Orthopédie et traumatologie) / 01.10.98
BATZENSCHLAGER André (Anatomie Pathologique) / 01.10.95	LANGER Bruno (Gynécologie) / 01.11.19
BAUMANN René (Hépatogastro-entérologie) / 01.09.10	LEVY Jean-Marc (Pédiatrie) / 01.10.95
BECMEUR François (Chirurgie Pédiatrique) / 01.09.23	LONSDORFER Jean (Physiologie) / 01.09.10
BERGERAT Jean-Pierre (Cancérologie) / 01.01.16	LUTZ Patrick (Pédiatrie) / 01.09.16
BERTHEL Marc (Gériatrie) / 01.09.18	MAILLOT Claude (Anatomie normale) / 01.09.03
BIENTZ Michel (Hygiène Hospitalière) / 01.09.04	MAITRE Michel (Biochimie et biol. moléculaire) / 01.09.13
BLICKLE Jean-Frédéric (Médecine Interne) / 15.10.17	MANDEL Jean-Louis (Génétiq.)/ 01.09.16
BLOCH Pierre (Radiologie) / 01.10.95	MANGIN Patrice (Médecine Légale) / 01.12.14
BOEHM-BURGER Nelly (Histologie) / 01.09.20	MARESCAUX Christian (Neurologie) / 01.09.19
BOURJAT Pierre (Radiologie) / 01.09.03	MARESCAUX Jacques (Chirurgie digestive) / 01.09.16
BOUSQUET Pascal (Pharmacologie) / 01.09.19	MARK Jean-Joseph (Biochimie et biologie cellulaire) / 01.09.99
BRECHENMACHER Claude (Cardiologie) / 01.07.99	MARK Manuel (Génomique fonctionnelle et cancer-IGBMC) / 01.07.23
BRETTES Jean-Philippe (Gynécologie-Obstétrique) / 01.09.10	MESSER Jean (Pédiatrie) / 01.09.07
BURSTEIN Claude (Pédopsychiatrie) / 01.09.18	MEYER Christian (Chirurgie générale) / 01.09.13
CANTINEAU Alain (Médecine et Santé au travail) / 01.09.15	MEYER Pierre (Biostatistiques, informatique méd.) / 01.09.10
CAZENAVE Jean-Pierre (Hématologie) / 01.09.15	MONTEIL Henri (Bactériologie) / 01.09.11
CHAMPY Maxime (Stomatologie) / 01.10.95	NISAND Israël (Gynécologie-Obstétrique) / 01.09.19
CHAUVIN Michel (Cardiologue) / 01.09.18	OUDET Pierre (Biologie cellulaire) / 01.09.13
CHELLY Jameleddine (Diagnostic génétique) / 01.09.20	PASQUALI Jean-Louis (Immunologie clinique) / 01.09.15
CINQUALBRE Jacques (Chirurgie générale) / 01.10.12	PATRIS Michel (Psychiatrie) / 01.09.15
CLAVERT Jean-Michel (Chirurgie infantile) / 31.10.16	Mme PAULI Gabrielle (Pneumologie) / 01.09.11
COLLARD Maurice (Neurologie) / 01.09.00	POTTECHER Thierry (Anesthésie-Réanimation) / 01.09.18
CONSTANTINESCO André (Biophysique et médecine nucléaire) / 01.09.11	REYS Philippe (Chirurgie générale) / 01.09.98
DIETEMANN Jean-Louis (Radiologie) / 01.09.17	RITTER Jean (Gynécologie-Obstétrique) / 01.09.02
DOFFOEL Michel (Gastroentérologie) / 01.09.17	RUMPLER Yves (Biol. développement) / 01.09.10
DUCLOS Bernard (Hépatogastro-Hépatologie) / 01.09.19	SANDNER Guy (Physiologie) / 01.09.14
DUFOUR Patrick (Centre Paul Straus) / 01.09.19	SAUDER Philippe (Réanimation médicale) / 01.09.20
DUPEYRON Jean-Pierre (Anesthésiologie-Réa. Chir.) / 01.09.13	SAUVAGE Paul (Chirurgie infantile) / 01.09.04
EISENMANN Bernard (Chirurgie cardio-vasculaire) / 01.04.10	SCHLAEDER Guy (Gynécologie-Obstétrique) / 01.09.01
FABRE Michel (Cytologie et histologie) / 01.09.02	SCHLIENGER Jean-Louis (Médecine Interne) / 01.08.11
FISCHBACH Michel (Pédiatrie) / 01.10.16	SCHRAUB Simon (Radiothérapie) / 01.09.12
FLAMENT Jacques (Ophtalmologie) / 01.09.09	SICK Henri (Anatomie Normale) / 01.09.06
GAY Gérard (Hépatogastro-entérologie) / 01.09.13	STEIB Annick (Anesthésiologie) / 01.04.19
GUT Jean-Pierre (Virologie) / 01.09.14	STIERLE Jean-Luc (ORL) / 01.09.10
HASSELMANN Michel (Réanimation médicale) / 01.09.18	STOLL Claude (Génétiq.)/ 01.09.09
HAUPTMANN Georges (Hématologie biologique) / 01.09.06	STOLL-KELLER Françoise (Virologie) / 01.09.15
HEID Ernest (Dermatologie) / 01.09.04	STORCK Daniel (Médecine interne) / 01.09.03
IMLER Marc (Médecine interne) / 01.09.98	TEMPE Jean-Daniel (Réanimation médicale) / 01.09.06
JACQMIN Didier (Urologie) / 09.08.17	TONGIO Jean (Radiologie) / 01.09.02
JAECK Daniel (Chirurgie générale) / 01.09.11	VAUTRAVERS Philippe (Médecine physique et réadaptation) / 01.09.16
JESEL Michel (Médecine physique et réadaptation) / 01.09.04	VEILLON Francis (Imagerie viscérale, ORL et mammaire) / 01.09.23
KAHN Jean-Luc (Anatomie) / 01.09.18	VEITTE Denis (Méd. interne, Diabète et mal. métabolique) / 01.01.23
KEHR Pierre (Chirurgie orthopédique) / 01.09.06	VEITTE Jean-Marie (Anatomie pathologique) / 01.09.13
KREMER Michel / 01.05.98	WALTER Paul (Anatomie Pathologique) / 01.09.09
KRETZ Jean-Georges (Chirurgie vasculaire) / 01.09.18	WIHLM Jean-Marie (Chirurgie thoracique) / 01.09.13
KRIEGER Jean (Neurologie) / 01.01.07	WILK Astrid (Chirurgie maxillo-faciale) / 01.09.15
KUNTZ Jean-Louis (Rhumatologie) / 01.09.08	WOLFRAM-GABEL Renée (Anatomie) / 01.09.96

Légende des adresses :

FAC : Faculté de Médecine : 4, rue Kirschleger - F - 67085 Strasbourg Cedex - Tél. : 03.68.85.35.20 - Fax : 03.68.85.35.18 ou 03.68.85.34.67

HOPITAUX UNIVERSITAIRES DE STRASBOURG (HUS) :

- NHC : **Nouvel Hôpital Civil** : 1, place de l'Hôpital - BP 426 - F - 67091 Strasbourg Cedex - Tél. : 03 69 55 07 08
- HC : **Hôpital Civil** : 1, Place de l'Hôpital - B.P. 426 - F - 67091 Strasbourg Cedex - Tél. : 03.88.11.67.68
- HP : **Hôpital de Hautepierre** : Avenue Molière - B.P. 49 - F - 67098 Strasbourg Cedex - Tél. : 03.88.12.80.00
- **Hôpital de La Robertsau** : 83, rue Himmerich - F - 67015 Strasbourg Cedex - Tél. : 03.88.11.55.11
- **Hôpital de l'Elsau** : 15, rue Cranach - 67200 Strasbourg - Tél. : 03.88.11.67.68

ICANS - Institut de CANcérologie Strasbourg : 17 rue Albert Calmette - 67200 Strasbourg - Tél. : 03 68 76 67 67

CMCO - Centre Médico-Chirurgical et Obstétrical : 19, rue Louis Pasteur - BP 120 - Schiltigheim - F - 67303 Strasbourg Cedex - Tél. : 03.88.62.83.00

C.C.O.M. - Centre de Chirurgie Orthopédique et de la Main : 10, avenue Baumann - B.P. 96 - F - 67403 Illkirch Graffenstaden Cedex - Tél. : 03.88.55.20.00

E.F.S. : Etablissement Français du Sang - Alsace : 10, rue Spielmann - BP N°36 - 67065 Strasbourg Cedex - Tél. : 03.88.21.25.25

IURC - Institut Universitaire de Réadaptation Clemenceau - CHU de Strasbourg et UGECAM (Union pour la Gestion des Etablissements des Caisses d'Assurance Maladie) - 45 boulevard Clemenceau - 67082 Strasbourg Cedex

**RESPONSABLE DE LA BIBLIOTHÈQUE DE MÉDECINE ET ODONTOLOGIE ET DU DÉPARTEMENT SCIENCES, TECHNIQUES ET SANTÉ
DU SERVICE COMMUN DE DOCUMENTATION DE L'UNIVERSITÉ DE STRASBOURG**

Monsieur Olivier DIVE, Conservateur

**LA FACULTÉ A ARRÊTÉ QUE LES OPINIONS ÉMISES DANS LES DISSERTATIONS QUI LUI SONT PRÉSENTÉES
DOIVENT ÊTRE CONSIDÉRÉES COMME PROPRES A LEURS AUTEURS ET QU'ELLE N'ENTEND NI LES APPROUVER, NI LES IMPROUVER**

SERMENT D'HIPPOCRATE

En présence des maîtres de cette école, de mes chers condisciples, je promets et je jure au nom de l'Être suprême d'être fidèle aux lois de l'honneur et de la probité dans l'exercice de la médecine. Je donnerai mes soins gratuits à l'indigent et n'exigerai jamais un salaire au-dessus de mon travail.

Admis à l'intérieur des maisons, mes yeux ne verront pas ce qui s'y passe.

Ma langue taira les secrets qui me seront confiés et mon état ne servira pas à corrompre les mœurs ni à favoriser les crimes.

Respectueux et reconnaissant envers mes maîtres je rendrai à leurs enfants l'instruction que j'ai reçue de leurs pères.

Que les hommes m'accordent leur estime si je suis resté fidèle à mes promesses. Que je sois couvert d'opprobre et méprisé de mes confrères si j'y manque.

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer mes remerciements à toutes les personnes qui m'ont soutenu et accompagné tout au long de mes études ; et plus particulièrement celles qui ont contribué à la réalisation de cette thèse d'exercice :

Au Professeur Maria GONZALEZ, pour l'encadrement dont j'ai bénéficié tout au long de ce travail, pour la richesse des enseignements que vous m'avez dispensés depuis l'externat et qui, je l'espère, durera encore.

Au Docteur Stéphanie SCARFONE, pour avoir accepté de codiriger ma thèse, pour ton investissement et ta présence, au moment le plus crucial, ont été les moteurs de cet accomplissement. Et enfin, pour ton écoute, ta bienveillance et ta bonne humeur, quotidiennes, durant le semestre où tu m'as accueilli.

Au Docteur Fabrice HUBELE et au Docteur Guillaume PAMART, pour l'intérêt que vous avez porté à ce travail en acceptant de siéger dans le jury.

A mes maitres de stage et encadrants dans la spécialité, les Docteurs Stéphanie KLEINLOGEL, Nathalie NOURRY, Negar SEDGHI, Marie TCHIBOZO, Valérie SCHACH-DELACROIX et George Horatiu SCARLAT, ainsi qu'à leurs équipes des Hôpitaux Universitaires de STRASBOURG, de Lilly FRANCE et de l'UGECAM, pour leur accueil et pour leur contribution à mon accomplissement dans l'exercice de la médecine du travail.

A tous mes encadrants en dehors de la spécialité, notamment les équipes du Centre de Réadaptation de MULHOUSE et du Centre des Troubles du Sommeil, pour la source d'apprentissage que vous avez été.

A Nicolas CLAUSS, pour avoir accepté que mon travail de thèse utilise ses travaux concernant la contamination du bâtiment « ex-oncologie » des Hôpitaux Universitaires de STRASBOURG.

A mes parents, Michel et Marie-Odile, ainsi qu'à mon frère, Jean-François, pour m'avoir soutenu tout au long de mon cursus.

A toute ma famille, pour ses encouragements.

A mes amis et co-internes, pour tous les moments que nous avons partagés. Plus particulièrement à Inès FONSECA et Charlotte BLANCO, pour les rendez-vous mensuels lors des derniers mois de travail qui m'ont permis de décompresser. Aux Docteurs Alessandro MEDDE et Asma KOUBAA pour les précieux conseils que vous m'avez dispensés mais aussi pour tous les moments partagés.

A Etienne FOEHRENBACH et Julien ERICSON, pour être présents chaque jour, pour le soutien que vous m'avez apporté dans ma vie étudiante et professionnelle, pour tous les moments de rire. Vous êtes comme une seconde famille.

Au Docteur Marc-André GOLTZENE, pour avoir été mon interne lorsque j'étais externe, pour avoir été mon chef lorsque j'étais interne, pour avoir été mon mentor depuis notre rencontre. Tu es aujourd'hui un ami fidèle et une source d'inspiration professionnelle. Sans ta présence, je n'en serais pas forcément là aujourd'hui.

A Lisa LENIG et Lisa WECHINGER-ABID, pour avoir égayé mon internat. Le trio que nous avons formé depuis le premier semestre restera à jamais graver dans ma mémoire et mon cœur.

A Nicolas GUNTZ, Loup LANG, Juliette CRIQUI et Elise PFISTER, pour votre présence et votre soutien qui m'ont aidé à tenir le coup lors de la préparation des Epreuves Classantes Nationales depuis le début de l'externat.

A tous mes autres amis, notamment Inès LEVEQUE, Quentin BALL, Aude THIRIET, Audrey TRAN, j'en oublie certainement beaucoup et j'espère qu'ils ne m'en voudront pas, pour tous les souvenirs partagés.

A l'Association Amicale des Etudiants et anciens étudiants de la faculté de Médecine de STRASBOURG (AAEMS) pour tous les moments de joie lors de mes mandats. Et en particulier à Delphine DAVID pour l'impression de ce manuscrit.

SOMMAIRE

LISTE DES ENSEIGNANTS	2
SERMEN D'HIPPOCRATE	13
REMERCIEMENTS	14
SOMMAIRE	17
LISTE DES ABREVIATIONS	20
LISTE DES FIGURES	23
LISTE DES TABLEAUX	24
LISTE DES ANNEXES	25
DEVELOPPEMENT	26
I. INTRODUCTION.....	26
A. Contexte de l'exposition au radium et au radon en milieu hospitalier.....	26
B. Justification de la synthèse de la littérature	29
C. Objectif de la recherche et questions de recherche	31
II. FONDEMENTS DE LA RADIOACTIVITE.....	33
A. Principes de base de la radioactivité.....	34
1. L'atome	34
2. Les isotopes.....	36
3. Stabilité du noyau atomique	37
4. La radioactivité.....	39
5. La loi de désintégration radioactive.....	45
6. Les réactions nucléaires	46
7. La pénétration des rayonnements dans la matière	47
B. Effets de la radioactivité sur l'Homme.....	50
1. Interactions des rayonnements ionisants avec la matière.....	50
2. Les lésions moléculaires provoquées par les rayonnements	55
3. Mort cellulaire par irradiation.....	57
4. Effets déterministes	57
5. Effets stochastiques	58
C. Importance de la radioprotection dans les environnements professionnels, focus sur le milieu hospitalier	60
1. Sources d'irradiation naturelles, l'exposition naturelle	61
2. Sources d'irradiation professionnelles, l'exposition professionnelle	63
3. La contamination	64
4. Grandeurs utilisées en radiothérapie.....	69
5. La survie	70
6. Grandeurs utilisées en radioprotection	70
7. Détection des rayonnements nucléaires.....	72
8. Cas des faibles doses.....	75
9. Réglementation.....	75
10. Rôle du médecin du travail et risque « rayonnements ionisants »	86
III. LE RADIUM ET SON UTILISATION PROFESSIONNELLE	89
A. Histoire et propriétés du radium	89
1. Découverte du radium	89
2. Propriétés physiques et chimiques	91

B.	Sources et voies d'exposition au radium, focus sur le milieu hospitalier	92
1.	Sources naturelles et anthropiques du radium	92
2.	Voies d'exposition au radium.....	93
3.	En milieu industriel	94
4.	Applications militaires.....	95
5.	En milieu hospitalier	96
C.	Effets sur la santé de l'exposition au radium	98
1.	Effets à court terme	98
2.	Effets à long terme.....	98
3.	Cas historiques	99
D.	Mesures de prévention et réglementation en vigueur	99
1.	Réglementation internationale et nationale.....	99
2.	Mesures de prévention en milieu professionnel	100
3.	Protocoles de manipulation et de stockage.....	102
4.	Gestion des déchets radioactifs et problèmes liés à la décontamination.....	103
IV.	LE RADON ET SON UTILISATION PROFESSIONNELLE	104
A.	Histoire et propriétés du radon	104
1.	Découverte du radon	104
2.	Propriétés physiques et chimiques	105
B.	Sources et voies d'exposition au radon, focus sur le milieu hospitalier	106
1.	Sources naturelles et anthropiques du radon.....	106
2.	Voies d'exposition au radon.....	107
3.	Utilisation du radon médical : la radiothérapie	108
4.	Autres utilisations professionnelles du radon.....	108
C.	Effets sur la santé de l'exposition au radon.....	109
1.	Effets à court terme	109
2.	Effets à long terme.....	109
3.	Cas historiques.....	110
D.	Mesures de prévention et réglementation en vigueur	110
1.	Réglementation internationale et nationale.....	110
2.	Mesures de prévention en milieu professionnel	111
V.	METHODOLOGIE DE LA SYNTHÈSE DE LA LITTÉRATURE.....	113
A.	Processus de recherche bibliographique	113
1.	Recherche dans les bases de données internationales.....	113
2.	Recherche dans les bases de données francophones	114
3.	Recherche de la littérature grise.....	114
4.	Définition des mots-clés et <i>MeSH (Medical Subject Heading)</i>	114
B.	Description des critères de sélection des études, critères d'inclusion et d'exclusion	119
C.	Exclusion de la littérature grise.....	120
D.	Méthodes d'analyse et de synthèse des données	122
VI.	SYNTHÈSE DES RESULTATS.....	123
A.	Effets sur la santé du radium et nécessité d'un suivi post-exposition	123
B.	Impact sur les populations exposées dans des bâtiments contaminés	128
C.	Effets sur la santé des faibles doses.....	130
D.	Recommandations scientifiques sur le suivi post-exposition pour les sujets exposés au risque radium / radon	135
VII.	REFLEXION SUR L'IMPACT DES RESULTATS SUR LA PRATIQUE EN MEDECINE ET SANTE AU TRAVAIL.....	141
A.	Suivi post-exposition ou suivi post-professionnel.....	141
B.	Dépistage et prévention des principales pathologies retrouvées dans la synthèse de la littérature 143	
1.	Cancer du poumon.....	143
2.	Autres pathologies	144
C.	Proposition de suivi post-professionnel / post-exposition à partir des données de la littérature ..	145
1.	Processus de réflexion	145
2.	Suivis post-exposition amiante et benzène	146
3.	Maladies professionnelles en lien avec les rayonnements ionisants	147

4.	Protocole proposé.....	147
5.	Distinction entre dépistage et diagnostic	150
6.	Pertinence du dépistage	151
VIII.	DISCUSSION	152
IX.	CONCLUSION	164
	ANNEXES.....	167
	BIBLIOGRAPHIE	185

LISTE DES ABREVIATIONS

.mc : Mot clé (pour la recherche à partir de mots clés dans certaines bases de données)

.ti : Titre (pour la recherche à partir de titres dans certaines bases de données)

A : Nombre de masse (nombre de nucléons)

ADN : Acide désoxyribonucléique

AEN : Agence pour l'énergie nucléaire

AIEA (= IAEA) : Agence internationale de l'énergie atomique

Andra : Agence Nationale pour la gestion des Déchets Radioactifs

Art. ou art. : Article (de loi)

ASN : Autorité de sûreté nucléaire

ASNR : Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection

CDA (= $X\frac{1}{2}$) : Couche de demi-atténuation

CDD : Contrat à durée déterminée

CIPR : Commission internationale de protection radiologique

CISMeF : Catalogue et index des sites médicaux en langue française

CRP : Conseiller en radioprotection

D : Dose

D_0 : Dose létale moyenne

DGT : Direction Générale du Travail

DL50 : Dose létale médiane

DMST : Dossier médical de santé au travail

E : Dose efficace

EBR : Efficacité biologique relative

ECG : Electrocardiogramme

EEG : Electroencéphalogramme

EFR : Explorations fonctionnelles respiratoires

E_l : Energie de liaison

EPC : Equipement de protection collective

EPI : Equipement de protection individuelle

ERR : Excès de risque relatif

EURATOM : Communauté européenne de l'énergie atomique

FAO : Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture

HAS : Haute autorité de santé

HEPA : *High-efficiency particulate air*

HR : *Hazard ratio*

Ht : Dose équivalente

HUS : Hôpitaux Universitaires de STRASBOURG

IC : Intervalle de confiance

ICRU : Commission internationale des unités et mesures radiologiques

INCa : Institut National du Cancer

INES : *International Nuclear and Radiological Event Scale*

INRS : Institut national de recherche et de sécurité

IRSN : Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire

IUPAC : Union international de chimie pure et appliquée

LiSSa : Littérature scientifique en santé

LLC : Leucémie lymphoïde chronique

MeSH : Medical subject headings

MMSE : *Mini-mental state examination*

MTPH : Médecine du travail du personnel hospitalier

NRC : Commission de réglementation nucléaire

N : Nombre de neutrons

NFS : Numération formule sanguine

NU : Nations Unies

OCDE : Organisation de coopération et de développement économiques

OIT : Organisation internationale du travail

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

PAHO : Organisation panaméricaine de la santé

PCR : Personne compétente en radioprotection

PRISMA : Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses

RH : Ressources humaines

RX : Rayons X

R γ : Rayons gamma

SCPRI : Service central de protection contre les rayonnements ionisants

SFMT : Société Française de Médecine du Travail

SFR : Société Française de Radiologie

SI : Système international

SIR : Suivi individuel renforcé

SIR : *Standardized incidence ration*

SMR : *Standardized mortality ration*

SPLF : Société de Pneumologie de Langue Française

SSTPH : Service de santé au travail du personnel hospitalier

TDM : Tomodensitométrie

TEP : Tomographie par émissions de positons

TLE : Transfert linéique d'énergie

UE : Union Européenne

UNSCEAR : Comité scientifique des Nations unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants

VTC : Vie très courte

WLM : *Working month level*

X : Symbole IUPAC d'un élément chimique

Z : Numéro atomique (nombre de protons)

LISTE DES FIGURES

Figure 1 - La constitution du noyau atomique et du nuage électronique.	35
Figure 2 - Tableau périodique des éléments, version 2016.	35
Figure 3 - Les isotopes du carbone.	37
Figure 4 - Courbe d'ASTON.	38
Figure 5 - Diagramme de SEGRÈ.	40
Figure 6 - Désintégration α du radium.	41
Figure 7 - Désintégrations β	42
Figure 8 - Freinage électronique.	44
Figure 9 - Emission de photons par fluorescence.	44
Figure 10 – Principe de la fusion (à droite) et de la fission (à gauche).	46
Figure 11 - Pénétration dans la matière des différents rayonnements radioactifs.	47
Figure 12 - Effet photoélectrique.	53
Figure 13 - Effet COMPTON.	54
Figure 14 – La matérialisation.	54
Figure 15 - Les sources de la radioactivité.	60
Figure 16 - Les différentes voies d'exposition.	67
Figure 17 – Valeur moyenne d'exposition à la radioactivité, par an et par habitant, en FRANCE.	68
Figure 18 – Variabilité de l'exposition de la population française.	68
Figure 19 – Les unités de mesure de la radioactivité.	71
Figure 20 - Les concepts de doses.	72
Figure 21 - Élaboration des règles de radioprotection.	77
Figure 22 – Délimitation des zones en fonction du risque radiologique.	83
Figure 23 – Pictogramme d'avertissement : Matières radioactives / Rayonnements ionisants.	85
Figure 24 – Panneau de signalisation de zone surveillée (bleue).	85
Figure 25 - Panneau de signalisation de zone contrôlée (verte).	85
Figure 26 - Panneau de signalisation de zone contrôlée (jaune).	85
Figure 27 - Panneau de signalisation de zone contrôlée (orange).	85
Figure 28 - Panneau de signalisation de zone contrôlée (rouge).	86
Figure 29 - Panneau de signalisation de zone extrémité.	86
Figure 30 – Production du radium à partir de l'uranium.	92
Figure 31 – Production naturelle du radon.	106
Figure 32 – Diagramme des flux d'inclusion des articles.	121

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 - Tableau des ordres de grandeurs, en mètre, de la taille de la galaxie aux protons/neutrons.....	34
Tableau 2 - Exemples de périodes radioactives.....	46
Tableau 3 – Effets déterministes localisés des rayonnements ionisants en fonction de la dose.	58
Tableau 4 - Effets déterministes généralisés des rayonnements ionisants en fonction de la dose.	58
Tableau 5 - Valeurs limites d'exposition en mSv sur 12 mois consécutifs.....	79
Tableau 6 – Conditions d'accès en zones réglementées pour les travailleurs.	84
Tableau 7 – Algorithmes utilisés pour la recherche bibliographique (objectif principal).....	115
Tableau 8 - Algorithmes utilisés pour la recherche bibliographique (objectif secondaire 1).	116
Tableau 9 - Algorithmes utilisés pour la recherche bibliographique (objectif secondaire 2).	117
Tableau 10 - Algorithmes utilisés pour la recherche bibliographique (objectif secondaire 3).	118
Tableau 11 – Examen complémentaires proposés dans le cadre du suivi post-exposition / post-professionnel aux rayonnements ionisants.	149

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 – Alphabet grec	167
Annexe 2 – Unités utilisées dans le manuscrit et leurs correspondances dans le SI.....	168
Annexe 3 – Préfixes des unités du SI.....	168
Annexe 4 – Éléments chimiques et leurs symboles (tri alphabétique selon le symbole chimique)	169
Annexe 5 – Checklist PRISMA-2020	170
Annexe 6 – Résumé synthétique des publications incluses dans le travail de thèse	171

DEVELOPPEMENT

I. Introduction

A. Contexte de l'exposition au radium et au radon en milieu hospitalier

En août 2020, dans le cadre d'un projet de restructuration d'un vieux bâtiment hospitalier, une équipe de techniciens en radioprotection effectue un contrôle de non contamination avant travaux. Ce bâtiment datant de 1911 a abrité des activités de radiologie au sein des Hospices Civils de STRASBOURG puis de curiethérapie de 1922 à 1990 et a également eu des activités d'hospitalisation puis de consultations externes en oncologie jusqu'en 2019. De ce fait, un contrôle systématique de non contamination radioactive avant travaux de restructuration a été fait. L'équipe qui pensait faire un simple contrôle de routine, découvre alors plusieurs « points chauds » notamment dans les sous-sols avec un débit de dose supérieur à plus de deux fois le bruit de fond¹ (1). Cette découverte a entraîné toute une série d'investigations au niveau de l'ensemble du bâtiment et des recherches dans les archives de l'hôpital afin de reconstituer l'historique des différentes activités à risque, les radio-isotopes utilisés, l'évolution du bâtiment en ce qui concerne les affectations des différentes pièces dans le temps, les travaux de réfection effectués, ...

¹ Le bruit de fond moyen en FRANCE est de 900 $\mu\text{Sv}\cdot\text{an}^{-1}$, soit environ 0,10 $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$.

Des contaminations au radium 226 et au césium 137 sont retrouvées dans plusieurs zones du bâtiment. Des mesures d'urgence sont alors prises, le bâtiment qui était inoccupé depuis 2019 est sécurisé avec une restriction et un contrôle des accès, une fermeture de toutes les zones avec une potentielle contamination labile, fermeture des portes d'accès au sous-sol, coupure des fluides, signalétique mentionnant le risque radioactif et l'interdiction d'accès sans autorisation, port d'équipements de protection adaptés pour les opérateurs amenés à intervenir sur le site et dosimétrie opérationnelle. Une déclaration est faite à l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) qui classe l'incident au niveau 1 de l'échelle INES (International Nuclear and Radiological Event Scale) qui va de 0 à 7. (2)

L'activité de curiethérapie au radium 226 a débuté aux Hospices Civils de STRASBOURG en 1922 grâce au Pr. GUNSETT, pionnier de la radiothérapie, avec aussi la création d'un des premiers centres anti-cancéreux de FRANCE en 1923, le centre Paul STRAUSS qui à l'époque était intégré à l'Hôpital Civil. A partir de 1959, le radium est progressivement remplacé par le césium 137 considéré comme ayant moins d'effets délétères pour la santé des opérateurs.

Les aiguilles et tubes de radium utilisés pour la curiethérapie ont été stockés dans des containers plombés placés au fond d'une fosse d'un monte-charge dans les sous-sols du bâtiment jusqu'à leur évacuation par le Service central de protection contre les rayonnements ionisants (SCPRI)² en 1988. L'accès à cette fosse et le monte-charge avaient été condamnés plusieurs années auparavant. Le bâtiment a été à ce moment-là considéré comme officiellement décontaminé. Toutefois les archives de l'époque retrouvent au même moment la notion d'inondations survenues dans les sous-sols suite à de violents orages qui ont pu disperser la contamination de certains sols.

² Ancêtre de l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN).

La découverte de plusieurs points de pollution historique au radium ainsi que la présence de radon dans certains secteurs des sous-sols ou des combles du bâtiment ont entraîné la mise en place d'un véritable plan d'actions avec un pilotage pluridisciplinaire composé notamment de la Direction du site, de la Direction des Ressources Humaines, du service de Radiophysique et de Radioprotection de l'établissement et du Service de Santé au Travail.

La décision d'une investigation complète du bâtiment, des sous-sols aux combles, dans tous les locaux y compris les zones d'hospitalisation conventionnelle et de consultations, bureaux du personnel, vestiaires, ..., a été prise avec une cartographie exhaustive des locaux. La détermination d'une méthodologie de marquage radiologique de chaque pièce a été réalisée avec des mesures de radioactivité associées à des frottis ou à des prélèvements afin d'évaluer les risques de contamination labile. Parallèlement, une enquête par questionnaire a été menée auprès d'environ 1 500 professionnels identifiés par le service RH comme ayant pu travailler dans ce bâtiment entre 1950 et 2019. Cette enquête avait pour objectifs d'identifier pour chaque personne les différents postes occupés selon les périodes d'activité et la localisation de ces postes à partir des plans des différents étages du bâtiment ainsi que les durées de travail dans chaque secteur. Ces éléments étaient importants afin de pouvoir ensuite, par groupes homogènes d'exposition, faire des calculs de doses cumulées et une estimation rétrospective du niveau d'exposition au risque radiologique.

La problématique pour l'équipe de santé au travail était de savoir s'il était nécessaire ou non de préconiser un suivi post-exposition des professionnels ayant travaillé dans ce bâtiment, en tenant compte de l'état actuel des connaissances sur les effets à long terme des faibles doses d'exposition aux rayonnements ionisants et en particulier au radium et au radon.

B. Justification de la synthèse de la littérature

Le cas d'une contamination au radium ainsi qu'au radon en milieu professionnel, et plus particulièrement en milieu hospitalier, est une situation peu fréquente.

La majeure partie des cas concerne les sites nucléaires, les sites d'extraction du radium ou encore les sites de traitements des déchets nucléaires. Ces derniers sont suivis par l'Agence Nationale pour la gestion des Déchets Radioactifs (Andra) dont la mission est de recenser les déchets radioactifs mais aussi assurer leur collecte et leur prise en charge, quel qu'en soit le type.

Concernant les déchets radioactifs issus du milieu médical, ceux-ci sont classés par l'Andra comme déchets à vie très courte (VTC) (3) et ne sont pas pris en charge par l'Agence car ils peuvent être gérés localement par décroissance radioactive.

Il existe toutefois des cas historiques de contamination concernant des sites non répertoriés. Le quartier des Coudraies de GIF-SUR-YVETTES, dans l'ESSONNE, en est un exemple. Entre 1912 et 1957, ce quartier accueillait le laboratoire de la Société nouvelle du radium, créé par un collaborateur de Marie CURIE. Ce laboratoire était consacré à l'étude du radium ainsi qu'au développement de ses applications. Dans les années 1960, ce quartier s'est transformé en zone d'habitations. Les maisons du début du XIXe siècle ainsi que les sols étaient pollués par le radium.(4)

C'est à partir de la fin des années 1990 qu'un recensement des sites pollués par la radioactivité a démarré au niveau national, grâce à la coopération entre l'Andra, l'Institut National de la Sûreté Nucléaire (IRSN), l'Agence de Sûreté Nucléaire (ASN) et l'Etat français.

Les sites les plus pollués, c'est-à-dire où la radioactivité était la plus importante, ont été décontaminés en priorité avec des opérations d'assainissement des terrains et la mise en place d'un dispositif de gestion de ces sites. Pour les sites où la pollution était plus faible, les opérations d'assainissement ont été réalisées et continuent à ce jour. Et de nouveaux sites sont découverts ou sont encore à découvrir, comme ce fut le cas pour les HUS.

La contamination au radium et au radon dans un bâtiment hospitalier est un vaste sujet regroupant des aspects historiques, sanitaires, techniques et environnementaux. Le choix d'une synthèse de la littérature permet ainsi de couvrir ces différents aspects, dans leur ensemble, sans être contraint par la rigueur que peut imposer une revue systématique.

En effet, devant un sujet complexe et multifactoriel comme le cas d'une contamination au radium et au radon en milieu professionnel, la synthèse de la littérature offre une souplesse méthodologique permettant d'inclure une diversité importante de sources. Cet aspect est d'autant plus pertinent dans le cadre de ce travail de recherche où, après une première revue des publications sur le sujet, les données apparaissent souvent obsolètes, insuffisantes voire inexistantes.

Par ailleurs, réaliser une revue systématique de la littérature implique d'avoir un important corpus de données, de haute qualité et comparables entre elles. Or, concernant le sujet de ce travail, les données disponibles peuvent varier considérablement en termes de qualité, de méthodologie ou encore de contexte. Cette hétérogénéité rend difficile l'application de la méthodologie rigoureuse imposée par une revue systématique.

De plus, la réalisation d'une revue systématique nécessite des ressources importantes en termes de temps et de moyens humains. Etant donné ces contraintes logistiques et temporelles, une synthèse de la littérature paraît être un choix plus pragmatique.

C. Objectif de la recherche et questions de recherche

Ce travail de recherche vise à explorer les potentiels effets sur la santé de cette contamination historique au radium et au radon ainsi qu'à identifier les moyens de prévention existants.

En effet, dans le cadre de cette contamination, des agents hospitaliers ont été exposés accidentellement et sur le lieu de travail, à une source radioactive sur une période prolongée. Cette exposition n'étant pas connue, ni des salariés, ni la direction, ni du Service de Santé au Travail du Personnel Hospitalier (SSTPH), le risque « rayonnement ionisant » n'était pas renseigné dans les dossiers médicaux des personnels concernés et ces derniers n'ont donc pas bénéficié d'un suivi en santé au travail adapté à ce risque.

Aujourd'hui, se pose la question de l'évaluation rétrospective des niveaux d'exposition et de la nécessité, ou non, de mettre en place un suivi post-exposition.

Les mesures et les évaluations des doses reçues, réalisées par Nicolas CLAUSS, ingénieur hospitalier en radioprotection et personne compétente en radioprotection (PCR) pour les HUS, laissent à penser que la majorité des agents qui ont travaillé dans le bâtiment ex-oncologie a été exposés à de faibles doses de radioactivité et ne présenteraient pas de surrisque significatif pour leur santé. Il ne serait donc pas nécessaire de mettre en place un suivi post-exposition pour ces agents. Toutefois, ceux exposés à de plus fortes doses pourraient en bénéficier, notamment les agents exposés sur la période la plus ancienne.

Ce travail vise à identifier les principaux effets sur la santé d'une contamination au radium et la nécessité de mettre en place un suivi post-exposition, à travers une synthèse de la littérature, mais aussi une analyse des recommandations françaises, européennes et internationales en matière de suivi en santé au travail et de prévention concernant le risque spécifique radium et plus largement les rayonnements ionisants.

Cette étude de la littérature permettra également de rechercher (objectifs secondaires) :

- Des données concernant des situations similaires de populations exposées dans des bâtiments contaminés au radium et l'éventuel impact sur la santé de ces sujets exposés accidentellement ;
- Des données concernant les effets sur la santé d'une exposition au radium, au radon ou à la radioactivité, même à faible dose, en milieu professionnel ;
- Des recommandations scientifiques sur le suivi post-exposition pour les sujets exposés au risque radium / radon.

II. Fondements de la radioactivité

Le dictionnaire LAROUSSE définit la radioactivité comme la « *propriété des nucléides instables de perdre spontanément de leur masse en émettant des particules ou des rayonnements électromagnétiques* ». (5)

Cette propriété est découverte en 1896 par Henri BECQUEREL (1852-1908 ; physicien français et lauréat du Prix NOBEL de physique³ en 1903). Alors qu'il souhaitait mettre en évidence l'émission de rayons X⁴ associée à de la fluorescence, par des sels d'uranium exposés préalablement à la lumière du Soleil. Il s'aperçut que ces sels, même à l'état non excités, c'est-à-dire non exposés à la lumière du Soleil, émettaient des rayonnements invisibles capables de traverser les couches de papier qui les contenaient et de s'imprimer sur une plaque photographique installée à proximité. Cette expérience lui permit de conclure que l'uranium émettait spontanément des rayonnements.

Un peu plus tard, Marie CURIE introduit le terme de radioactivité (du latin *radius* qui signifie rayon et *agere* qui signifie agir, faire ; littéralement, « qui émet des rayons »). (6)

La radioactivité est un processus naturel au cours duquel des atomes instables, possédant un surplus d'énergie, subissent une désintégration pour se transformer en d'autres atomes, qu'ils soient stables ou non. Durant cette transformation, ils expulsent leur énergie excédentaire sous la forme de rayonnements invisibles.

³ Prix NOBEL partagé avec Pierre et Marie CURIE.

⁴ Les rayons X ont été découverts en 1895 par le physicien allemand, Wilhelm Conrad RÖNTGEN.

La radioactivité artificielle a, quant à elle, été découverte quelques décennies plus tard, par Irène et Frédéric JOLIOT-CURIE. Leurs expériences, permettant la formation de nouveaux noyaux radioactifs, leur ont valu d'obtenir le Prix NOBEL de chimie en 1935.

A. Principes de base de la radioactivité

La majorité des notions de physique nucléaire développées dans cette partie est tirée de l'ouvrage d'Arnaud BOQUET « Physique nucléaire et radioprotection à l'usage de l'environnement nucléaire » (2019).(7)

1. L'atome

La matière, quelle qu'elle soit, est constituée d'atomes.

La taille d'un atome est de l'ordre de 10^{-10} m [Tableau 1].(8)

	Galaxie	Soleil	Terre	Humain	Cellule	Molécule	Atome	Noyau	Nucléons
Ordre de grandeur (m)	10^{21}	10^9	10^7	1	10^{-5}	10^{-9}	10^{-10}	10^{-14}	10^{-15}

Tableau 1 - Tableau des ordres de grandeurs, en mètre, de la taille de la galaxie aux protons/neutrons.(9)

a. Le noyau atomique

Les atomes sont composés d'un noyau central, formé de protons et de neutrons, autour duquel des électrons tournent en orbite [Figure 1]. Les protons sont des particules élémentaires, appartenant au noyau atomique, chargées positivement. Les neutrons sont des particules élémentaires, appartenant au noyau atomique, qui ne sont chargées ni positivement, ni négativement. Protons et neutrons forment ensemble les nucléons.(10)

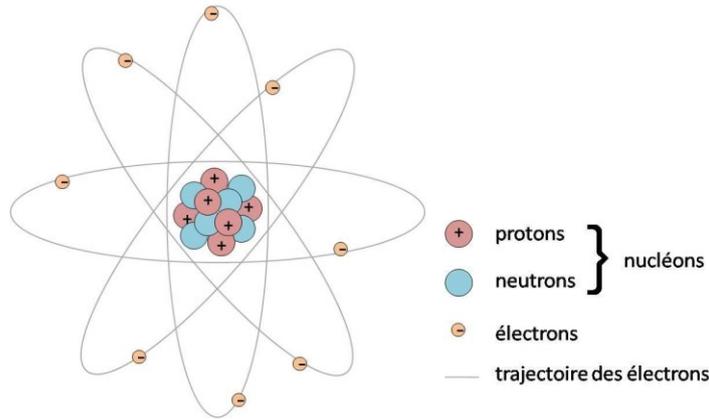


Figure 1 - La constitution du noyau atomique et du nuage électronique. (11)

Chaque atome (noté par convention X ; X étant remplacé par le symbole de l'Union internationale de chimie pure et appliquée (IUPAC) de chaque atome. Ex. H pour l'hydrogène, C pour le carbone, ...) est défini et classé dans le tableau périodique des éléments par le nombre de protons dans son noyau [Figure 2].

Tableau périodique des éléments

Groupe	1	2											13	14	15	16	17	18	
Période	IA	IIA											IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	VIIIA	
1	hydrogène 1 H 1,00794																	hélium 2 He 4,002602	
2	lithium 3 Li 6,941	béryllium 4 Be 9,012182											bore 5 B 10,811	carbone 6 C 12,0107	azote 7 N 14,00674	oxygène 8 O 15,9994	fluor 9 F 18,9984032	néon 10 Ne 20,1797	
3	sodium 11 Na 22,98976928	magnésium 12 Mg 24,3050											aluminium 13 Al 26,9815386	silicium 14 Si 28,0855	phosphore 15 P 30,973762	soufre 16 S 32,066	chlore 17 Cl 35,4527	argon 18 Ar 39,948	
4	potassium 19 K 39,0983	calcium 20 Ca 40,078	scandium 21 Sc 44,955912	titane 22 Ti 47,867	vanadium 23 V 50,9415	chrome 24 Cr 51,9961	manganèse 25 Mn 54,938045	fer 26 Fe 55,845	cobalt 27 Co 58,933195	nickel 28 Ni 58,6934	cuivre 29 Cu 63,546	zinc 30 Zn 65,39	gallium 31 Ga 69,723	germanium 32 Ge 72,61	arsenic 33 As 74,92160	sélénium 34 Se 78,96	brome 35 Br 79,904	krypton 36 Kr 83,80	
5	rubidium 37 Rb 85,4678	strontium 38 Sr 87,62	yttrium 39 Y 88,90585	zirconium 40 Zr 91,224	niobium 41 Nb 92,90638	molybdène 42 Mo 95,94	technétium 43 Tc 97,9072	ruthérium 44 Ru 101,07	rhodium 45 Rh 102,90550	palladium 46 Pd 106,42	argent 47 Ag 107,8682	cadmium 48 Cd 112,411	indium 49 In 114,818	étain 50 Sn 118,710	antimoine 51 Sb 121,760	tellure 52 Te 127,60	iode 53 I 126,90447	xénon 54 Xe 131,29	
6	césium 55 Cs 132,9054519	barium 56 Ba 137,327	lanthanides 57-71		hafnium 72 Hf 178,49	tantale 73 Ta 180,94788	tungstène 74 W 183,84	rénium 75 Re 186,207	osmium 76 Os 190,23	iridium 77 Ir 194,217	platine 78 Pt 195,084	or 79 Au 196,966569	mercure 80 Hg 200,59	thallium 81 Tl 204,3833	plomb 82 Pb 207,2	bismuth 83 Bi 208,98040	polonium 84 Po [209,9824]	astate 85 At [209,9871]	radon 86 Rn [222,0176]
7	francium 87 Fr [223,0197]	radium 88 Ra [226,0254]	actinides 89-103		thorium 90 Th [232,03806]	protactinium 91 Pa [231,03588]	uranium 92 U 238,02891	neptunium 93 Np [237,0482]	plutonium 94 Pu [244,0642]	américium 95 Am [243,0614]	curium 96 Cm [247,0703]	berkélium 97 Bk [247,0703]	californium 98 Cf [251,0796]	einsteinium 99 Es [252,0830]	fermium 100 Fm [257,0951]	mendélévium 101 Md [258,0984]	nobélium 102 No [259,1011]	lawrencium 103 Lr [262,110]	

Figure 2 - Tableau périodique des éléments, version 2016. (12)

Un noyau qui a un nombre défini de protons et de neutrons est appelé un nucléide.

Un nucléide est caractérisé par X, le symbole selon les normes IUPAC, par Z, le numéro atomique représentant le nombre de protons, et par A, le nombre de masse correspondant au total des nucléons. Il s'écrit alors sous la forme : A_ZX .

b. Le nuage électronique

Les électrons sont des particules chargées négativement environ 2 000 fois plus petites que les nucléons. L'ensemble des électrons d'un atome forme le nuage électronique dont chaque électron est séparé des autres et du noyau par du vide.

Les électrons sont à la fois attirés vers le noyau grâce aux forces électrostatiques qui tendent à rapprocher les charges positives et négatives, et cherchent à s'en éloigner grâce à leur énergie cinétique. Ces deux forces s'équilibrent pour maintenir les électrons autour du noyau. Le nuage électronique s'organise en orbitales qui sont des représentations probabilistes de la répartition des électrons autour du noyau atomique.

Un atome contient autant d'électrons que de protons⁵.

Ce sont les électrons qui sont responsables des propriétés physiques des atomes.

2. Les isotopes

Les isotopes sont des atomes dont les noyaux contiennent le même nombre de protons (Z), mais un nombre différent de neutrons, ce qui entraîne une variation du nombre de masse (A).

Ils sont notés : AX .

L'indice Z peut être omis, car le symbole chimique X permet d'identifier l'élément de manière unique.(13)

⁵ Les éléments chimiques ayant un excès ou un défaut d'électrons sont appelés des ions.

Par exemple, le carbone est présent sur Terre sous plusieurs isotopes : ^{12}C , ^{13}C , ^{14}C [Figure 3].

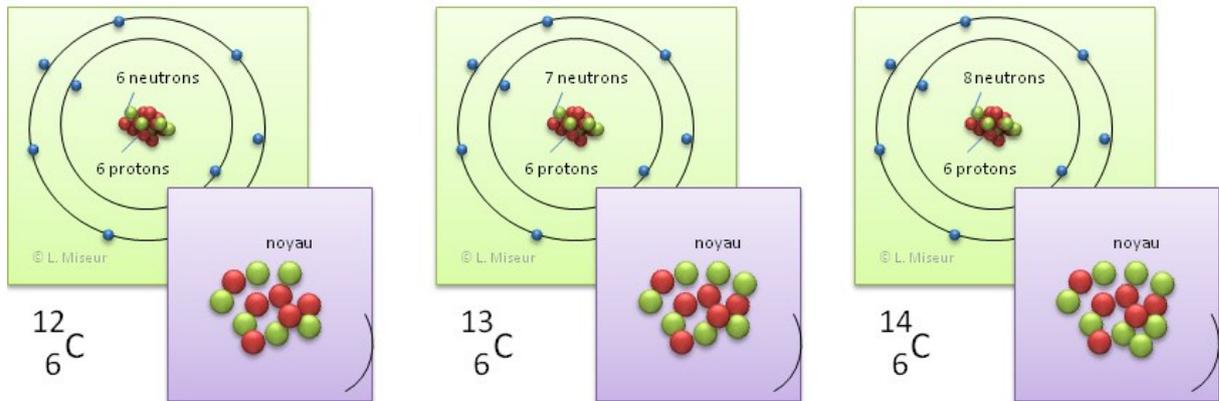


Figure 3 - Les isotopes du carbone.(14)

Étant donné que le nombre d'électrons détermine les propriétés chimiques d'un élément, les isotopes possèdent les mêmes caractéristiques chimiques.

3. Stabilité du noyau atomique

Pour qu'un noyau soit stable, ses nucléons doivent être dans un état lié. Bien que les protons subissent une répulsion électrique en raison de leurs charges positives, une force d'attraction encore plus puissante assure la cohésion du noyau : la force nucléaire. Cette interaction, de courte portée ($< 2 \text{ fm}^6$), agit de la même manière sur tous les nucléons, indépendamment de leur charge. Elle est environ 10^6 fois plus intense que les forces de liaison interatomiques ou intermoléculaires.

⁶ 1 fm (femtomètre) correspond à 10^{-15} m.

Pour séparer entièrement les nucléons d'un noyau stable, il est nécessaire de lui fournir une quantité d'énergie minimale, appelée énergie de liaison (E_l), qui est exprimée en électronvolt⁷ (eV) ou mégaelectronvolt⁸ (MeV).

L'énergie de liaison étant un reflet de la cohésion des nucléons au sein du noyau atomique, plus E_l est élevée, plus l'élément chimique sera stable.

Afin de comparer les énergies de liaison entre différents noyaux, on calcule l'énergie de liaison moyenne par nucléon en divisant l'énergie de liaison totale (E_l) par le nombre de nucléons (A). En appliquant ce calcul à chaque élément chimique, on obtient une courbe qui montre l'énergie de liaison moyenne par nucléon en fonction du nombre de nucléons dans le noyau ; c'est la courbe d'ASTON⁹ [Figure 4].

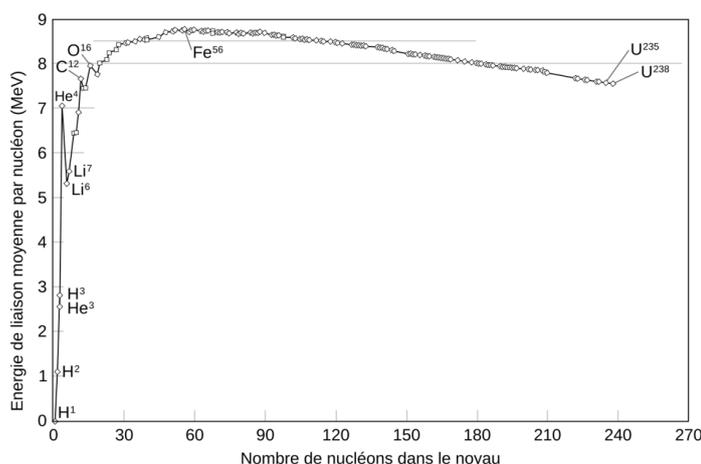


Figure 4 - Courbe d'ASTON.(15)

Le principe de radioactivité peut être considéré comme une tendance des nucléides instables à tendre vers les nucléides les plus stables représentés sur la courbe d'ASTON par les nucléides au voisinage du ⁵⁶Fe.

⁷ 1 eV = $1,6 \cdot 10^{-19}$ J

⁸⁸ 1 MeV = 10^6 eV

⁹ Du nom du physicien britannique Francis William ASTON (1877-1945).

4. La radioactivité

Il existe plus de 3 400¹⁰ nucléides à ce jour. Parmi eux, on dénombre 252 nucléides naturels stables et 85 nucléides naturels instables. Par ailleurs, il existe près de 3 000 nucléides instables qui ont été produits de manière artificielle.

Les nucléides instables sont radioactifs, c'est-à-dire qu'ils vont se désintégrer pour tendre vers la stabilité en émettant des rayonnements (ou des particules). Ces nucléides radioactifs sont appelés radionucléides.(16)

a. Multiplicité des éléments chimiques

Les différentes espèces de nucléides peuvent être représentées sous la forme du diagramme de SEGRÈ¹¹¹². Il s'agit d'une carte des nucléides [Figure 5], représentant sur l'axe des abscisses le nombre de neutrons (N) et sur l'axe des ordonnées le nombre de protons (Z).

Contrairement au tableau périodique des éléments de MENDELÉËV, ce diagramme permet de recenser tous les isotopes d'un même élément chimique, qui diffèrent par leur nombre de neutrons et donc par leurs caractéristiques radioactives.

Ce diagramme est organisé par code couleur :

- En rouge, les nucléides stables (rassemblés dans la vallée de la stabilité) ;
- En couleurs (autres que le rouge), les radionucléides, selon leur mode de désintégration.

¹⁰ En 2012, IUPAC recense 118 éléments chimiques dont 94 sont naturels et présents sur Terre.

¹¹ D'après Emilio Gino SEGRÈ (1905-1985), physicien italo-américain, lauréat du Prix NOBEL de physique en 1959.

¹² La version actuelle date de 1992, il s'agit de la *STRASBOURG Universal Nuclide Chart*.

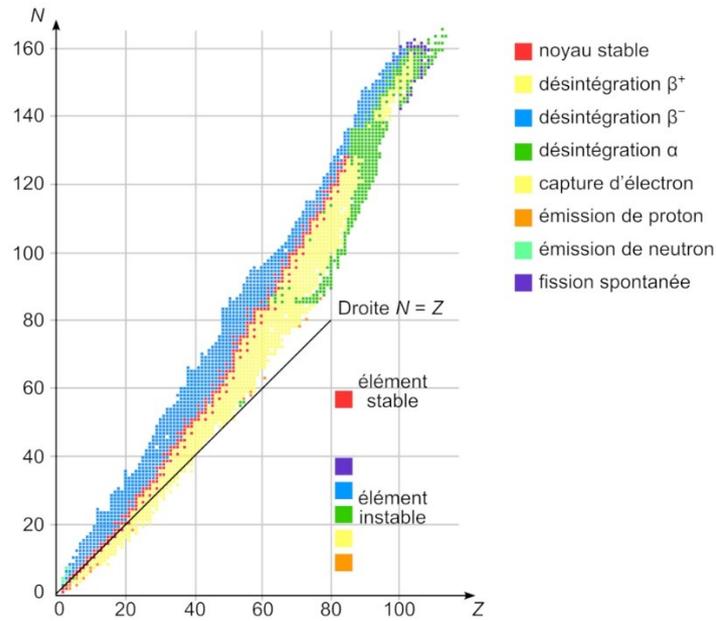


Figure 5 - Diagramme de SEGRÈ.(17)

Il est à noter qu'au-delà $A = 40$ environ, c'est-à-dire quand le noyau comporte plus de 40 nucléons, il est nécessaire que $N > Z$ pour que les éléments chimiques soient stables.

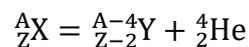
En dehors de la vallée de la stabilité, un nucléide se transforme spontanément en un nucléide plus stable, plus ou moins rapidement, en émettant un rayonnement pour dégager de l'énergie.

b. Désintégration α

La plupart des désintégrations α se produisent principalement pour des nucléides avec $A > 200$.

Une désintégration α correspond à l'émission d'un isotope de l'hélium : ${}^4_2\text{He}$ [Figure 6].

L'équation de la désintégration α s'écrit sous la forme :



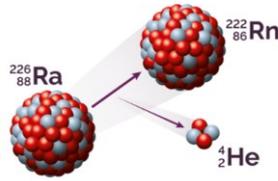


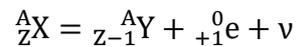
Figure 6 - Désintégration α du radium.(18)

La désintégration α peut s'accompagner de l'émission d'un rayonnement γ .

c. Désintégration β^+

La désintégration β^+ fait intervenir l'émission d'un positon¹³ et d'un neutrino¹⁴ créés au moment de l'émission d'un proton converti en neutron [Figure 7].

L'équation de la désintégration β^+ s'écrit sous la forme :



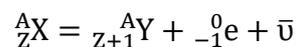
La désintégration β^+ peut s'accompagner de l'émission d'un rayonnement γ .

La désintégration β^+ concerne les nucléides ayant un défaut de neutrons, donc un excès de protons.

d. Désintégration β^-

La désintégration β^- fait intervenir l'émission d'un électron et d'un antineutrino¹⁵ créés au moment de l'émission d'un neutron converti en proton [Figure 7].

L'équation de la désintégration β^- s'écrit sous la forme :



¹³ Antiparticule élémentaire de charge électrique +1 associée à l'électron.

¹⁴ Particule élémentaire électriquement neutre.

¹⁵ Particule élémentaire électriquement neutre.

La désintégration β^- peut s'accompagner de l'émission d'un rayonnement γ .

La désintégration β^- concerne les nucléides ayant un excès de neutrons, donc un défaut de protons.

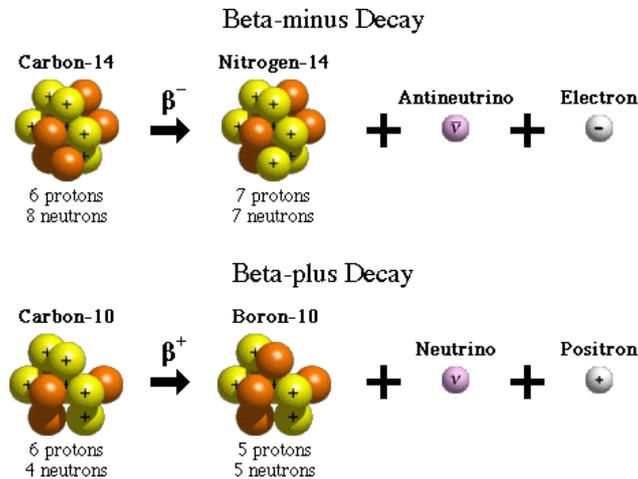


Figure 7 - Désintégrations β .(19)

e. Rayons γ

Lorsque dans la matière un positon de faible énergie entre en collision avec un électron de faible énergie, les deux particules s'annihilent, transformant leur masse en énergie sous forme de deux photons γ . Les rayons γ sont des photons extrêmement énergétiques, avec une longueur d'onde très courte ($\lambda < 5 \text{ pm}$), produits lors des transitions des noyaux entre différents niveaux d'énergie.

Ils sont généralement émis après une désintégration α ou β , ou lorsque le noyau atteint un état excité à la suite d'une collision. L'émission d'un photon γ n'affecte ni le numéro atomique (Z) ni le nombre de masse (A). Le plus souvent, un noyau excité se désexcite presque instantanément, par émission γ .

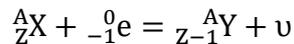
f. Rayons X

Ce sont des rayonnements électromagnétiques de grande énergie (1 keV – 10 MeV) et de très courte longueur d'onde ($5 \text{ pm} < \lambda < 10 \text{ nm}$). Ils ont les mêmes caractéristiques que les rayonnements γ , mais ils sont décalés vers les faibles énergies.

Leur origine est différente, les rayonnements γ sont issus de phénomènes nucléaires alors que les rayons X sont produits par l'interaction d'un électron accéléré avec les atomes de la matière.

i. Capture électronique

Un électron de la couche la plus interne de l'atome entre dans le noyau et interagit avec un proton pour former un neutron et un neutrino qui, lui, est expulsé du noyau.



La capture électronique crée une lacune électronique, et il y aura émission de rayons X qui sont des photons de plus faible énergie que les photons γ .

ii. Freinage électronique ou bremsstrahlung

Lorsqu'un électron rapide, doté d'une énergie cinétique donnée, passe à proximité d'un noyau, il subit une force coulombienne d'attraction qui incurve sa trajectoire. Du fait de cette force, l'électron subit une accélération radiale et est ralenti [Figure 8].

Dans ce cas, le rayonnement émis est un photon X, dont l'énergie est prélevée sur l'énergie cinétique de la particule. On l'appelle photon de freinage.

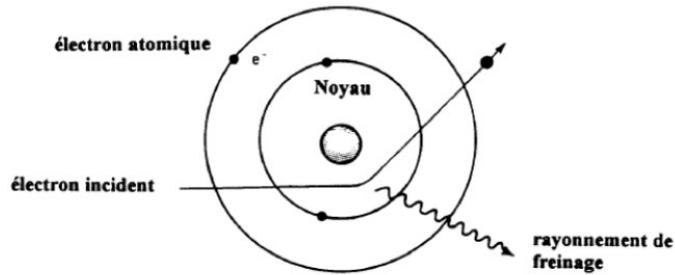


Figure 8 - Freinage électronique.(20)

iii. Transition interne ou mécanisme de fluorescence

Ce mécanisme de formation de rayons X correspond à un choc entre deux électrons : un électron libre incident et un électron d'un atome.

Les transitions internes provoquent l'éjection de l'électron atomique de son orbite. Si c'est un électron d'une couche externe, on aura une ionisation, mais pas de rayons X. Si c'est un électron d'une couche interne, il se crée une lacune électronique. Elle sera comblée par des électrons des couches plus externes. A chaque transition correspond une libération d'énergie sous la forme d'un photon X [Figure 9].

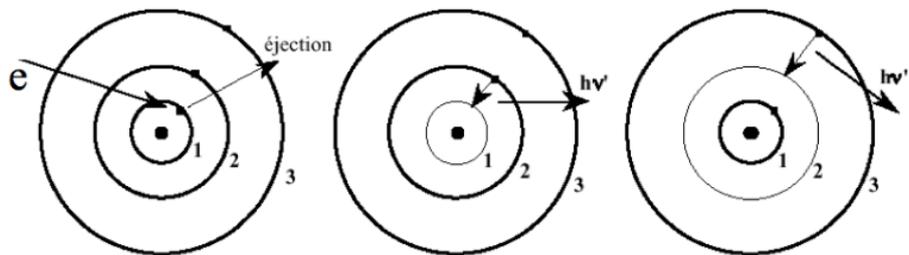


Figure 9 - Emission de photons par fluorescence.(20)

5. La loi de désintégration radioactive

La désintégration radioactive est un processus aléatoire. Chaque désintégration est un événement indépendant, et il est impossible de prédire précisément quand un noyau se désintégrera.

Lorsqu'un noyau se désintègre, il se transforme en un autre nucléide, qui peut être radioactif ou stable.

Si un échantillon contient un grand nombre de nucléides, le taux de désintégration est proportionnel au nombre de noyaux N présents. Le facteur de proportionnalité est la constante de désintégration λ .

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda \cdot N$$

Cette équation permet, par intégration, d'obtenir la relation suivante :

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

Il s'agit du nombre de nucléides restant après un temps t .

Ceci permet ensuite de définir l'expression de la demi-vie¹⁶ ($T_{1/2}$), c'est-à-dire le temps au bout duquel le nombre de nucléides de départ (N_0) est divisé par deux.

$$T_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda}$$

La demi-vie correspond donc au temps nécessaire pour que la moitié des noyaux se désintègre, quel que soit le nombre de noyaux au départ [Tableau 2].

¹⁶ Également appelée période.

Radionucléide	Période radioactive
Technétium 99m	6 heures
Iode 123	13 heures
Thallium 201	73 heures
Tellure 132	78 heures
Iode 131	8 jours
Césium 134	2.2 ans
Tritium	12.3 ans
Plutonium 241	13.2 ans
Césium 137	30.2 ans
Uranium 238	4,5 milliards d'années

Tableau 2 - Exemples de périodes radioactives.(21)

La demi-vie n'est pas à confondre avec la vie moyenne (τ) qui correspond à la durée de vie moyenne d'un radionucléide.

6. Les réactions nucléaires

Les réactions nucléaires conduisent à la formation d'éléments plus stables, caractérisés par une énergie de liaison par nucléon plus élevée. Il existe deux types de réactions nucléaires. Les réactions de fusion(22) se produisent sur des éléments légers, comme l'hydrogène, et forment des éléments plus lourds ; ces réactions sont actuellement difficiles à maîtriser et se manifestent, par exemple, lors des explosions de bombes H. En revanche, les réactions de fission(23) se déroulent sur des éléments lourds, produisant des éléments plus légers ; elles se rencontrent principalement dans les centrales nucléaires et les bombes A [Figure 10].

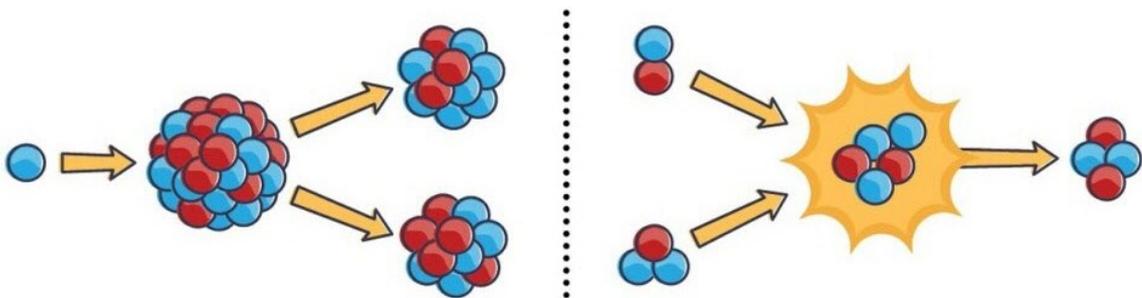


Figure 10 – Principe de la fusion (à droite) et de la fission (à gauche).(24)

Ces réactions peuvent être reproduites artificiellement dans des cyclotrons où les particules sont accélérées (protons, neutrons, électrons ou particules α) puis bombardées sur des noyaux cibles.

7. La pénétration des rayonnements dans la matière

Les éléments produits lors des réactions de désintégration radioactive ou lors des réactions nucléaires peuvent pénétrer la matière [Figure 11].

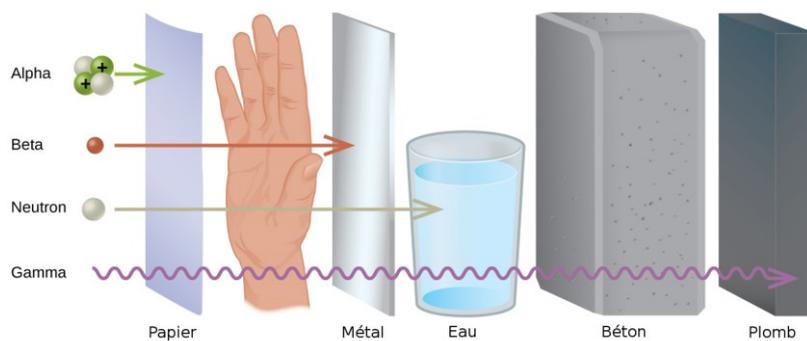


Figure 11 - Pénétration dans la matière des différents rayonnements radioactifs. (25)

a. Les rayonnements α

Les particules α sont des noyaux d'hélium dont les énergies cinétiques sont caractéristiques de l'atome émetteur.

Du fait de leur charge et de leur masse élevées, ces particules sont fortement absorbées par la matière. Rapidement, elles sont freinées après un trajet en ligne droite dont la longueur dépend de l'énergie initiale. En effet, ce sont des particules lourdes qui sont peu déviées par les collisions avec les électrons. En moyenne, la distance parcourue dans les tissus biologiques est de quelques dizaines de microns. À la surface de la peau, une particule α libère son énergie dans les cellules les plus superficielles de l'épiderme, au niveau de la couche cornée.

En radioprotection, une feuille de papier ou un gant protecteur suffit pour arrêter une particule α .

Si un émetteur α est absorbé dans l'organisme, puis concentré dans une cellule donnée, il irradie fortement la cellule concernée ainsi que les cellules voisines.

b. Les rayonnements β

Comme il n'est porteur que d'une seule charge (positive ou négative), le rayonnement β est moins vite absorbé que le rayonnement α . Il interagit moins avec la matière mais pénètre plus profondément.

Le parcours de la particule dépend de l'énergie mais reste inférieur à quelques millimètres. La masse de la particule est très faible, elle est donc facilement déviée lors des interactions avec les électrons et noyaux des atomes rencontrés. Les déviations sont d'autant plus importantes et fréquentes que l'énergie de la particule est faible. Le trajet est sinueux, surtout en fin de parcours lorsque l'énergie est faible. Une fois ralenti, l'électron se fond dans la foule des autres électrons, en s'intégrant par exemple au cortège électronique d'un atome.

Un positon a le même parcours qu'un électron. En fin de parcours, comme il s'agit d'antimatière, on aura une annihilation avec un électron, puis production de deux photons.

En surface de la peau, les particules β pénètrent jusqu'aux couches profondes de l'épiderme, celles des cellules vivantes, où elles délivrent une grande partie de leur énergie, provoquant une altération des tissus. S'il y a ingestion dans l'organisme, l'émetteur β délivre son énergie dans les zones proches de son point d'émission.

En radioprotection, une faible épaisseur de matière peut arrêter les particules β . Ce sont quelques millimètres d'aluminium (Al), par exemple.

c. Les rayonnements X et γ

Ces rayonnements sont des radiations électromagnétiques. L'énergie est transportée sous la forme de photons, particules sans charge et de masse négligeable. La quantité d'énergie transportée est caractéristique de l'élément émetteur.

Ce sont des rayonnements très pénétrants. Par exemple, leur trajet est d'une centaine de mètres dans l'air. Toutefois, les éléments lourds les arrêtent facilement.

Leur absence de charge leur permet de traverser très facilement les tissus biologiques et le corps humain.

En radioprotection, plusieurs centimètres de plomb (Pb) sont nécessaires pour les arrêter. Dans les centrales nucléaires, plusieurs mètres d'eau autour des réacteurs permettent de travailler sans danger.

d. Les neutrons

Les neutrons, étant des particules neutres, ne sont pas affectés par les champs électriques présents à l'intérieur des atomes. Ils perdent leur énergie en entrant en collision avec les noyaux qu'ils rencontrent.

Ce sont des rayons très pénétrants, car les noyaux étant très petits, les collisions sont rares. De plus, la particule étant non chargée, le fait de passer proche d'un noyau ne la freine pas.

Ils transmettent leur énergie aux noyaux qui reculent sous le choc. Le ralentissement est plus rapide dans une matière hydrogénée où les noyaux de recul sont des protons de masse égale aux neutrons.

Le neutron finit par être capturé par un noyau qui peut alors devenir radioactif, lorsqu'il est suffisamment ralenti.

Les neutrons traversent aisément les métaux lourds, mais sont absorbés par les atomes légers, tels que l'hydrogène (H), et donc par le corps humain.

e. La couche de demi-atténuation (CDA)

La couche de demi-atténuation, ou épaisseur moitié ($X_{1/2}$), correspond à l'épaisseur d'un matériau nécessaire pour réduire de moitié l'intensité du rayonnement incident.

Exprimée en centimètres (cm), cette épaisseur dépend de la nature du matériau traversé et de l'énergie du faisceau de rayonnement incident.

B. Effets de la radioactivité sur l'Homme

Les rayonnements émis par les radionucléides sont qualifiés d'ionisants, car ils ont la capacité d'extraire des électrons des atomes de la matière avec laquelle ils interagissent, modifiant ainsi leurs propriétés chimiques.(26)

1. Interactions des rayonnements ionisants avec la matière

Quand les rayonnements pénètrent dans la matière, ils interagissent avec les atomes (noyaux et électrons) traversés et peuvent perdre à chaque interaction une partie de leur énergie. L'énergie est communiquée au milieu traversé. Les conséquences les plus importantes sont l'ionisation et l'excitation des atomes et des molécules. Lors de l'ionisation, un électron est arraché de la couche périphérique, créant une paire d'ions. Pour ce faire, il faut communiquer à l'atome une énergie au moins égale à l'énergie de liaison. Les énergies de liaison des atomes de la matière sont comprises entre 10 eV et 4 000 eV.

Dans un milieu aqueux, l'énergie moyenne pour provoquer une ionisation est de 32 eV. Par conséquent, une particule de 1 MeV entièrement absorbée génère environ 30 000 ionisations.

Les rayonnements α et β sont directement ionisants.

Les rayonnements γ et les neutrons sont indirectement ionisants, car l'essentiel des ionisations est provoqué par les électrons ou protons mis en mouvement lors de l'interaction primaire de ces rayonnements avec la matière.

Quand une particule chargée d'une énergie cinétique élevée traverse un milieu, elle est progressivement ralentie après une cascade d'interactions avec les noyaux et les électrons du milieu.

Lors de chaque interaction, une partie de leur énergie est entièrement ou partiellement communiquée à l'atome rencontré. Si cette énergie est inférieure à l'énergie de liaison de l'électron rencontré, on n'a pas d'ionisation. Les atomes sont portés à un niveau d'énergie supérieur, soit par excitation électronique, soit par élévation de l'énergie cinétique de translation, d'oscillation ou de rotation moléculaire. Dans ce cas, l'énergie est entièrement absorbée par la molécule. Si elle est supérieure à l'énergie de liaison, l'ionisation est possible. L'électron est alors éjecté avec une énergie cinétique qui est transférée secondairement à d'autres atomes ou molécules, par ionisation, excitation ou transfert thermique.

Au terme de son parcours, la moitié de l'énergie cinétique de la particule incidente est transférée au milieu sous forme d'ionisations et l'autre moitié sous forme de transferts thermiques ou d'excitations.

a. Le transfert linéique d'énergie (TLE)

Le transfert linéique d'énergie (TLE) correspond à l'énergie déposée dans un milieu en fonction de la distance parcourue par la particule, exprimé en $\text{keV} \cdot \mu\text{m}^{-1}$.

Plus le TLE est élevé, plus une grande quantité d'énergie est libérée sur une courte distance. Dans les tissus biologiques, les dommages sont d'autant plus importants que l'énergie localement déposée par la particule incidente est élevée.

i. Rayonnements α

Le TLE est très élevé. On a un très grand nombre d'ionisations et d'excitations sur le trajet.

ii. Rayonnements β

Le TLE est faible. Sur le parcours la densité d'ionisation est faible, sauf en fin de parcours où on a des grappes d'ionisation correspondant à des dépôts d'énergie de densité élevée.

iii. Rayonnements γ ou X

Contrairement aux particules chargées qui cèdent progressivement leur énergie à la matière, les photons X et γ se déplacent à la vitesse de la lumière (c) et ne peuvent être ralentis. Ils ne peuvent être que transmis, diffusés ou absorbés.

Lors de la transmission, les rayonnements traversent la matière sans s'arrêter.

Lors de la diffusion, ils sont déviés de leur trajectoire initiale.

L'absorption se fait selon trois modes : l'effet photoélectrique, l'effet COMPTON et la matérialisation.

- **L'effet photoélectrique** : [Figure 12]

Un photon γ transfère toute son énergie à un électron, généralement situé dans les couches internes de l'atome, provoquant ainsi l'éjection de cet électron.

L'effet photoélectrique est majoritaire pour les rayons X et γ dont l'énergie est inférieure à 50 keV, mais il devient beaucoup moins significatif à des énergies plus élevées.

À la suite de l'effet photoélectrique, on a la création d'une lacune électronique dans l'atome cible. La place vacante sera prise par l'électron le plus périphérique ou par un électron extérieur à l'atome.

Le retour à la structure fondamentale se fait de deux manières. Par émission d'un photon de fluorescence ou par effet AUGER (un électron d'une couche plus externe comble la lacune. L'énergie libérée par cette transition est communiquée à un électron périphérique qui est alors expulsé avec une énergie cinétique. Cet effet prédomine pour les éléments légers).

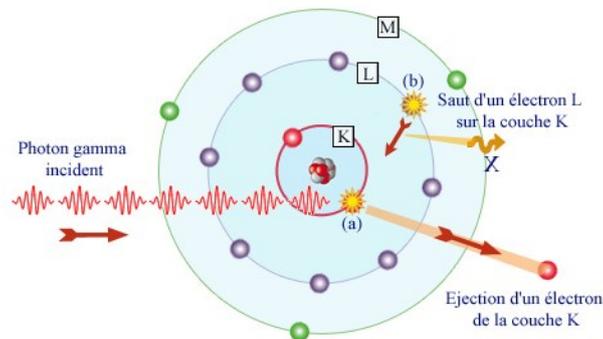


Figure 12 - Effet photoélectrique.(27)

- **L'effet COMPTON** : [Figure 13]

L'effet COMPTON se produit lorsque le photon γ ou X interagit avec un électron libre ou faiblement lié à la cible. Le photon incident est alors dévié d'un angle θ , entraînant une augmentation de sa longueur d'onde, tandis que l'électron initialement au repos est éjecté dans une direction différente, sous un angle φ .

Cet effet est le principal mécanisme d'absorption des rayons γ ou X dont l'énergie se situe entre 100 keV et 10 MeV, et il ne dépend pas du numéro atomique du matériau absorbant les photons γ ou X.

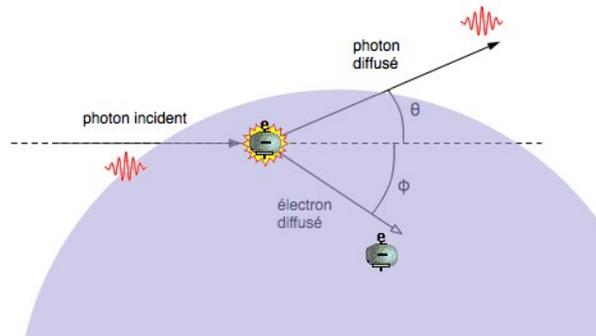


Figure 13 - Effet COMPTON.(28)

- **La matérialisation** : [Figure 14]

Le photon incident disparaît lors de l'interaction avec un noyau. L'énergie du photon est utilisée pour créer un électron et un positon. L'énergie restante est communiquée aux deux particules sous forme d'énergie cinétique.

Après perte de son énergie cinétique, le positon disparaît par dématérialisation en se combinant avec un électron de la matière, donnant lieu à deux photons γ , émis à 180° l'un de l'autre.

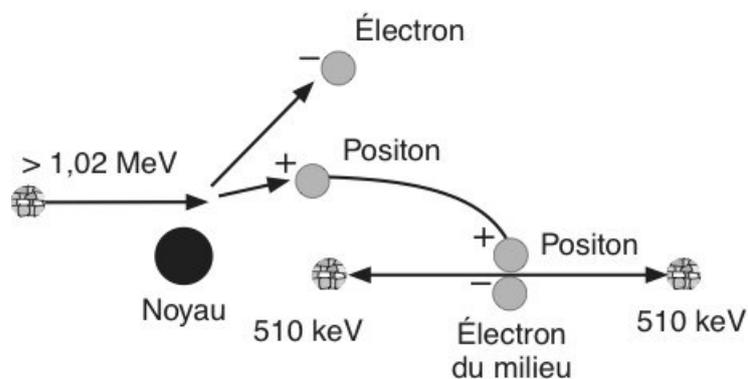


Figure 14 – La matérialisation.(29)

b. La dose absorbée

Il s'agit de l'énergie totale absorbée par unité de masse de matière, exprimée en gray (Gy),

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J.kg}^{-1}.$$

2. Les lésions moléculaires provoquées par les rayonnements

Les rayonnements ionisants induisent des lésions moléculaires avec une grande efficacité et de manière peu spécifique. Les effets ne sont pas liés à une élévation de la température du milieu sous l'effet des rayonnements. Les événements physiques initiaux responsables des lésions moléculaires sont les ionisations et, dans une moindre mesure, les excitations. Les molécules ayant acquis un excès d'énergie par ionisation ou excitation sont très instables.

L'excès d'énergie est évacué soit par l'émission d'un photon de fluorescence, soit par le transfert d'énergie à une liaison chimique voisine, sur la même molécule ou sur une molécule voisine, pouvant provoquer la rupture de la liaison. Il y a induction d'une lésion moléculaire.

Le pourcentage de molécules qui subissent une ionisation est très faible. Une dose de 1 Gy génère une ionisation pour 10^8 molécules d'eau. Dans un noyau cellulaire, une dose de 1 Gy génère environ 2 000 ionisations.

Dans les cellules vivantes toutes les molécules peuvent être modifiées, mais deux sont particulièrement importantes :

- La molécule d'eau (H_2O) qui représente 70 % du poids du corps et qui est le siège des lésions les plus fréquentes ;
- La molécule d'ADN, compte tenu de son importance biologique et des conséquences de sa modification.

a. Radiolyse de l'eau et effets indirects

L'irradiation de l'eau aboutit à une molécule d'eau qui peut être excitée ou ionisée. L'ionisation de l'eau conduit à l'éjection d'un électron ayant pour ioniser d'autres molécules d'eau à leur tour. La molécule d'eau ionisée se distingue par la présence d'un électron non apparié au niveau d'une liaison chimique. Secondairement, très rapidement, se forment des molécules stables, telles que le dihydrogène (H_2) ou le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2), et des radicaux libres possédant également un électron non apparié (H^\bullet , $^\bullet OH$).

Sur le plan biologique, le radical hydroxyle ($^\bullet OH$) est l'espèce la plus réactive issue de la radiolyse de l'eau. Il peut ioniser des molécules par oxydation, il peut rompre les liaisons carbone-hydrogène ou encore se fixer sur des doubles liaisons ou au sein d'un cycle aromatique.

Certaines molécules comme O_2 augmentent l'effet biologique des rayonnements. On dit que l'oxygène a un effet sensibilisateur.

b. Effet direct des rayonnements sur l'ADN

Les rayonnements ionisants peuvent provoquer de multiples lésions de la molécule d'ADN car c'est une molécule assez fragile sur laquelle les modifications sont efficaces. Les dommages comprennent des ruptures simple ou double brin, des altérations chimiques des bases ou des sucres, ainsi que des pontages intra- ou intermoléculaires.(30)

Les modifications les plus fréquentes sont les ruptures simple brin, on en compte 500 à 1 000 par Gy et par noyau, les lésions des bases (800 à 2 000 par Gy et par noyau) et les lésions des sucres (8 00 à 1 600 par Gy et par noyau).

La grande majorité des lésions de l'ADN induites par une irradiation de 1 Gy n'a aucune expression biologique car la plupart des lésions radio-induites sont réparées par les mécanismes de la cellule. Mais aussi parce que toutes les régions du génome ne sont pas également sensibles aux radiations (régions non codantes, gènes réprimés, ...), toutes les régions n'ont pas la même importance.

Les lésions de l'ADN peuvent induire des aberrations chromosomiques, des mutations, voire des cancers.

3. Mort cellulaire par irradiation

La mort cellulaire n'est immédiate que pour des doses très élevées de l'ordre de plusieurs centaines de gray. Dans les autres cas, les cellules peuvent continuer à fonctionner plusieurs heures, mais ont perdu leur capacité de division. On parle de mort différée quand les cellules disparaissent après un temps variable dépendant de la vitesse de renouvellement cellulaire.

En raison de cette perte de capacité de division, plus la division cellulaire normale est rapide, plus la mort cellulaire par suite d'une irradiation est rapide.

La mort cellulaire est définie comme la perte irréversible de la capacité de prolifération cellulaire. Elle est d'autant plus précoce que les cellules ont un haut pouvoir de prolifération (cellules de la moelle osseuse, crypte intestinale, peau et cellules cancéreuses).

4. Effets déterministes

Ces effets apparaissent obligatoirement au-dessus d'un seuil d'exposition dont la valeur est connue pour un effet donné. Ils sont d'autant plus graves que la dose est élevée. Dans un tissu, les cellules les plus radiosensibles, peu différenciées et à renouvellement rapide, sont détruites en plus grande proportion.

Ces effets sont d'apparition précoce, en quelques jours ou mois.(31) Ils sont réversibles dans la mesure où les cellules souches ne sont pas lésées, et ainsi l'homéostasie cellulaire repeuple en partie les lignées détruites.

On distingue les effets selon que l'irradiation soit localisée [Tableau 3] ou générale [Tableau 4].

a. Irradiation localisée

Organe	Dose	Effets
Peau	< 1 Gy	Pas d'effet observable, sensibilité aux irradiations ultérieures
	1-5 Gy	Erythème
	10 Gy	Phlyctènes
	50 Gy	Nécrose
Yeux	< 5 Gy	Opacification du cristallin
	> 5 Gy	Cataracte
Thyroïde	> 200 Gy	Insuffisance thyroïdienne
Gonades	> 6 Gy	Stérilité définitive

Tableau 3 - Effets déterministes localisés des rayonnements ionisants en fonction de la dose.(32)

b. Irradiation généralisée

Dose absorbée	Effets
< 1 Gy	Aucun effet observable, modifications de la formule sanguine
1-4 Gy	Fatigue, nausées, vomissements, destruction des lignées hématopoïétiques
4-5 Gy	DL50 : mort survenant chez 50 % de la population exposée
6-10 Gy	Diarrhées, vomissements, hémorragies digestives,
> 10 Gy	Œdème cérébral, céphalées, convulsions, coma

Tableau 4 - Effets déterministes généralisés des rayonnements ionisants en fonction de la dose.(33)

5. Effets stochastiques

Contrairement aux effets déterministes, ils n'apparaîtront pas obligatoirement et leur apparition ne dépend pas d'une dose seuil.(34)

Le phénomène initial est une mutation non létale, mal ou non réparée, pouvant être à l'origine d'un cancer ou d'anomalies héréditaires.

La probabilité pour que l'une des cellules d'un individu irradié à 1 Gy donne naissance à un cancer est très faible. Si l'effet se manifeste, sa gravité est indépendante de la dose reçue, elle ne dépend que de la nature du cancer radio-induit et de sa propre évolution.

Bien que le cancer soit le risque tardif principal des irradiations, il est difficile à mettre en évidence, car un cancer radio-induit est difficile à distinguer d'un cancer naturel. De plus, il y a souvent des temps très longs (de 2 à 40 ans) entre l'irradiation et l'apparition des cancers.

Il existe une nécessité d'études épidémiologiques à long terme, notamment concernant les survivants de HIROSHIMA, de NAGASAKI et de TCHERNOBYL.

Le risque le plus important des irradiations est la leucémie. Ce risque est plus important par rapport à une population de référence.(35)

Concernant TCHERNOBYL, on a observé une forte augmentation des cancers de la thyroïde.(36)

Pour les autres cancers, le risque est accru de 1,2 à 3 fois. Tout cela dépend de la dose qui est comprise entre 0,5 et 5 Gy et de l'âge du sujet lors de l'irradiation.(37)

C. Importance de la radioprotection dans les environnements professionnels, focus sur le milieu hospitalier

La radioactivité peut être d'origine naturelle ou artificielle [Figure 15].(38)

La radioactivité naturelle est celle qui existe spontanément dans la Nature, sans intervention humaine. Elle peut être :

- D'origine tellurique, par désintégration de l'uranium (U) et du radium (Ra) présents dans la croûte terrestre ;
- D'origine cosmique, provenant du Soleil, des étoiles et des galaxies ;
- D'origine physiologique, provenant des radioéléments présents dans le corps humain et issus de l'alimentation (potassium 40 (^{40}K), carbone 14 (^{14}C), ...).

La radioactivité artificielle est issue de l'activité humaine.

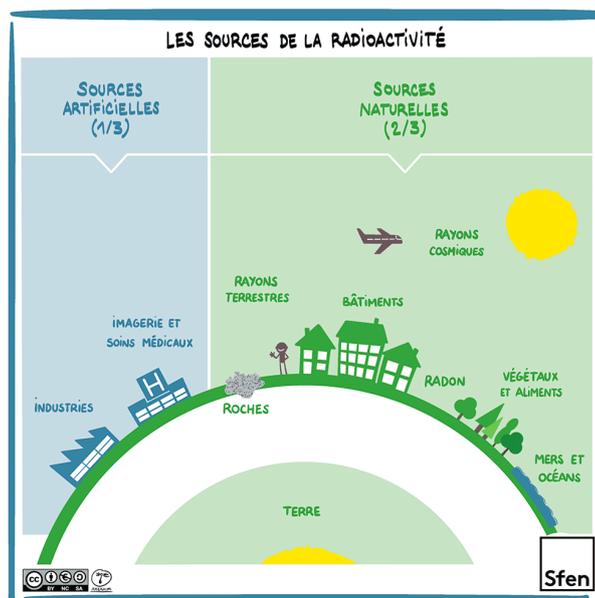


Figure 15 - Les sources de la radioactivité.(39)

1. Sources d'irradiation naturelles, l'exposition naturelle

C'est la source principale d'irradiation de l'Homme. Elle est soumise à d'importantes variations selon la situation géographique et l'habitat.

Chez l'homme, la dose efficace annuelle par an est d'environ 2,5 mSv, mais elle peut être 10 fois plus importante.(40)

a. Origine interne à l'organisme

Elle est due aux radionucléides présents dans l'organisme. Elle est deux fois plus importante que l'irradiation externe. Le radon (Rn) qui est un émetteur de particules α en est la contribution majeure. Le radon est un gaz rare radioactif d'origine naturelle qui est produit par la désintégration du radium (Ra). Il est responsable de 50 % de l'irradiation naturelle ; une fois inhalé, il se dépose sur les parois des voies aérodigestives et irradie les tissus environnants.

Le potassium 40 (^{40}K) est une contribution inévitable à l'irradiation naturelle avec une dose efficace annuelle de 0,18 mSv ; cette contribution est peu variable, car il existe un contrôle homéostatique rigoureux du corps pour cet élément.(41)

Le radium 226 (^{226}Ra) se concentre dans les végétaux comestibles de certains pays.

Le plomb 210 (^{210}Pb) et le bismuth 210 (^{210}Bi) sont présents dans la viande de renne et de caribou que certaines populations mangent.

b. Origine externe à l'organisme

Elle est due pour moitié aux rayonnements cosmiques et aux rayonnements telluriques qui sont émis par les radionucléides du sol.(42)

i. Rayonnements cosmiques

Ces flux de particules à haute énergie sont omniprésents dans l'Univers.

La partie chargée est majoritairement composée de protons, représentant entre 85 et 90 %, ainsi que de noyaux d'hélium (He), variant entre 9 et 14 %. La composante neutre comprend des rayons γ et des neutrinos.

Les rayonnements cosmiques augmentent considérablement avec l'altitude, doublant à 1 500 m. En avion, le débit d'exposition est environ 100 fois plus élevé qu'au niveau de la mer.

Une dose de 55 mSv a été mesurée lors du vol spatial Saliout VI¹⁷ de 175 jours.

ii. Rayonnements telluriques

Les principaux éléments radioactifs de l'écorce terrestre sont le potassium 40 (⁴⁰K), le rubidium 87 (⁸⁷Rb), l'uranium 238 (²³⁸U) et le thorium 232 (²³²Th). Leur concentration varie avec la nature des roches et des sédiments. Dans certaines régions du globe, notamment en IRAN, zone riche en Radium, les irradiations vont jusqu'à 400 mSv par an.

iii. Exposition médicale

Cela concerne la radiographie, le scanner, la radiothérapie, ... La dose efficace annuelle est faible, elle est de 0,8 mSv par an.

¹⁷ Station spatiale soviétique ayant été en service entre 1977 et 1982.

2. Sources d'irradiation professionnelles, l'exposition professionnelle

a. Utilisation de la radioactivité, hors domaine médical

La radioactivité permet d'explorer le monde du Vivant, la Terre et son histoire. En effet, les radionucléides sont fréquemment utilisés en géologie, océanographie ou encore en climatologie pour, par exemple, la datation, le suivi des courants océaniques ou encore la prédiction des éruptions volcaniques et des séismes.(43)

Les réactions nucléaires sont également utilisées dans la production d'électricité. Par exemple, concernant la FRANCE, les trois-quarts de sa production électrique sont issus de centrales nucléaires qui utilisent l'uranium (U) ou encore le polonium (Po) comme combustibles.

Dans l'industrie, la radioactivité est utilisée pour des tâches très variées, telles que le contrôle des soudures ou encore la détection de fuites.

Dans le secteur de la recherche, la radioactivité est fréquemment utilisée, notamment en physique, en chimie ou encore en biologie.

Dans d'autres secteurs, tels que l'agriculture, l'industrie agroalimentaire ou encore la muséographie, les éléments radioactifs sont utilisés comme moyens de protection des cultures, des aliments ou des pièces antiques contre les insectes ou les parasites.

Par conséquent, à travers ces utilisations diverses et variées, de nombreux travailleurs sont exposés quotidiennement aux rayonnements ionisants.

b. Utilisation des rayonnements ionisants et des radionucléides en médecine

L'activité médicale est exposante pour les usagers du système de santé, mais il ne faut pas oublier les professionnels de santé qui y sont exposés, quotidiennement, dans le cadre de leur activité professionnelle.

L'exposition professionnelle aux rayonnements ionisants et radionucléides dans le domaine médical concerne :

- La radiologie : les radiographies et la tomodensitométrie sont des techniques d'imagerie médicale faisant appel aux rayons X ;
- La médecine nucléaire : l'imagerie médicale nucléaire utilise principalement des photons γ , notamment dans la tomographie par émissions de positons (TEP) ou la scintigraphie ;
- La radiopharmacie : il s'agit d'une spécialité de la pharmacie hospitalière en charge de la préparation et de la dispensation des radiopharmaceutiques. C'est-à-dire des médicaments radioactifs utilisés en médecine nucléaire (traceurs ou vecteurs tels que l'iode 131 (^{131}I) ou en oncologie (radiothérapie).

3. La contamination

La contamination correspond à la présence non désirée de substances radioactives sur les surfaces (sols, murs, plans de travail, ...), les vêtements professionnels (y compris de protection) ou encore le corps humain. [Figure 16].

Elle est, majoritairement, liée aux mauvaises pratiques professionnelles (non-respect des procédures de manipulation des sources), mais peut aussi être liée à un incident sur la source (comme une source non ou mal scellée) ou encore à des facteurs externes à la source (chauffage, pompage, dépression, bain-marie, centrifugeuse, réactions chimiques, ...).

Trois types de contamination sont classiquement décrits (surfactive, atmosphérique et corporelle) et sont en relation les uns avec les autres.

a. La contamination surfactive

Elle correspond à la contamination des surfaces de travail (paillasse, bureaux à proximité, matériel informatique, ...) par des radionucléides. Ces derniers peuvent, ou non, se disperser sous forme de particules en suspension ou d'aérosols et contaminer d'autres surfaces ou même être responsables de différentes voies de contamination (atmosphérique ou corporelle).

La contamination surfactive peut, par conséquent, être responsable d'une exposition externe, par exemple par contact cutané ou avec les vêtements, mais aussi d'une contamination interne par inhalation, voire par ingestion (par exemple en portant ses doigts à la bouche après avoir touché une surface contaminée).

La mesure de la contamination surfactive se fait à l'aide de contaminamètres et s'exprime en Bq.cm^{-2} .

Ce type de contamination est difficile à éliminer et nécessite une action mécanique énergique ou encore chimique à l'aide de solutions, de gels ou de mousses.

b. La contamination atmosphérique

Elle correspond à la présence de radionucléides sous forme de particules ou d'aérosols en suspension dans l'atmosphère environnant. Elle est, le plus souvent, la conséquence d'un autre type de contamination s'étant dispersé.

Cela entraîne inévitablement une exposition interne de l'organisme par le biais de l'inhalation.

Elle peut également être responsable d'une contamination surfacique par dépôt des radionucléides en suspension sur les surfaces de travail et d'une contamination corporelle, notamment en cas de nuage ou de brouillard radioactif, par dépôt cutané.

La concentration dans l'air est mesurée ou estimée en Bq.m^{-3} .

L'air contaminé peut être filtré, mais le plus souvent, les particules en suspension se déposeront au sol et sur les surfaces environnantes, nécessitant une décontamination mécanique.

c. La contamination corporelle

Elle correspond à une contamination de l'organisme, par voie externe via un contact cutané avec les radionucléides ou interne par incorporation des radionucléides dans l'organisme.

Cette incorporation peut se faire par inhalation, par ingestion, mais aussi par voie transcutanée ou transmuqueuse.

La contamination corporelle cutanée peut se mesurer à l'aide de contaminamètres. En cas d'ingestion et/ou d'inhalation, il peut être nécessaire de réaliser des examens radiotoxicologiques des selles et des urines des personnes contaminées ; l'IRSN dispose également d'installations d'anthroporadiométrie, fixes ou mobiles, mais celles-ci sont peu nombreuses.

En cas de contamination corporelle cutanée, il est nécessaire de retirer tous les vêtements contaminés, et de se laver à l'eau et au savon. Il existe également des solutions chimiques décontaminantes. Les solutions hydroalcooliques ne sont pas efficaces.

En cas d'inhalation et/ou d'ingestion, des chélateurs existent pour certains radionucléides. Il est toutefois souvent conseillé de boire beaucoup d'eau pour éliminer la contamination par voie urinaire.

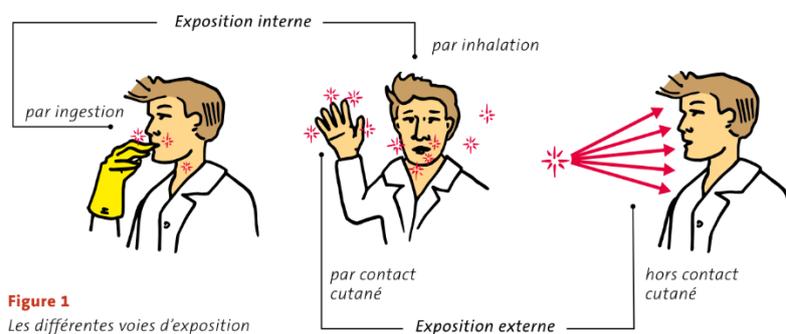


Figure 1
Les différentes voies d'exposition

Figure 16 - Les différentes voies d'exposition.(44)

d. Exposition de la population (45)

Chaque année, la population française est exposée à une dose efficace moyenne de 4,5 mSv par habitant. Cette exposition se répartit en 3 mSv provenant de sources de radioactivité naturelle (radon, rayonnements telluriques, cosmiques, ainsi que de l'eau et de l'alimentation), 1,5 mSv issus de sources médicales, et 0,01 mSv liés à d'autres activités humaines, y compris le nucléaire [Figure 17].

VALEUR MOYENNE D'EXPOSITION AVEC LA GAMME TYPIQUE DE VARIATION

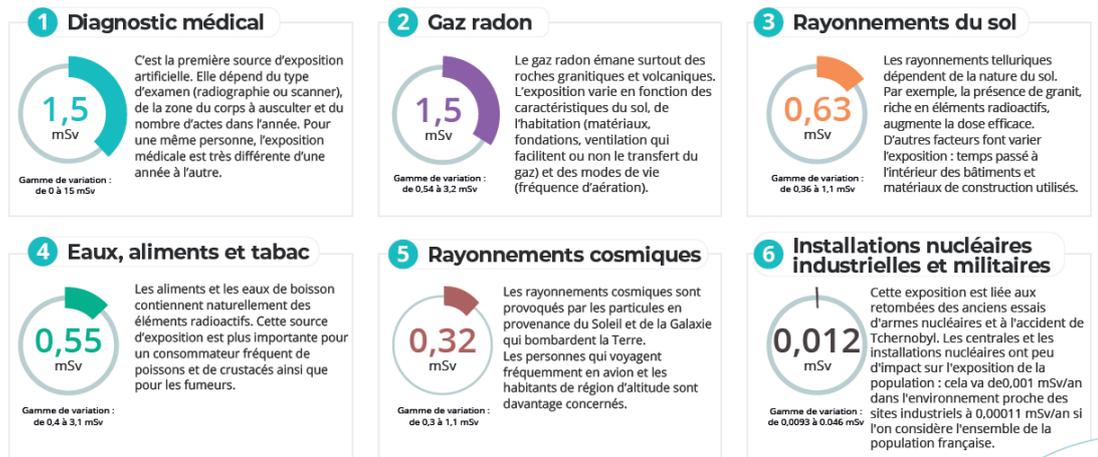


Figure 17 – Valeur moyenne d'exposition à la radioactivité, par an et par habitant, en FRANCE. (45)

De plus, les expositions à la radioactivité naturelle et médicale varient significativement d'une personne à l'autre, en grande partie en raison des diagnostics et des traitements médicaux reçus [Figure 18].

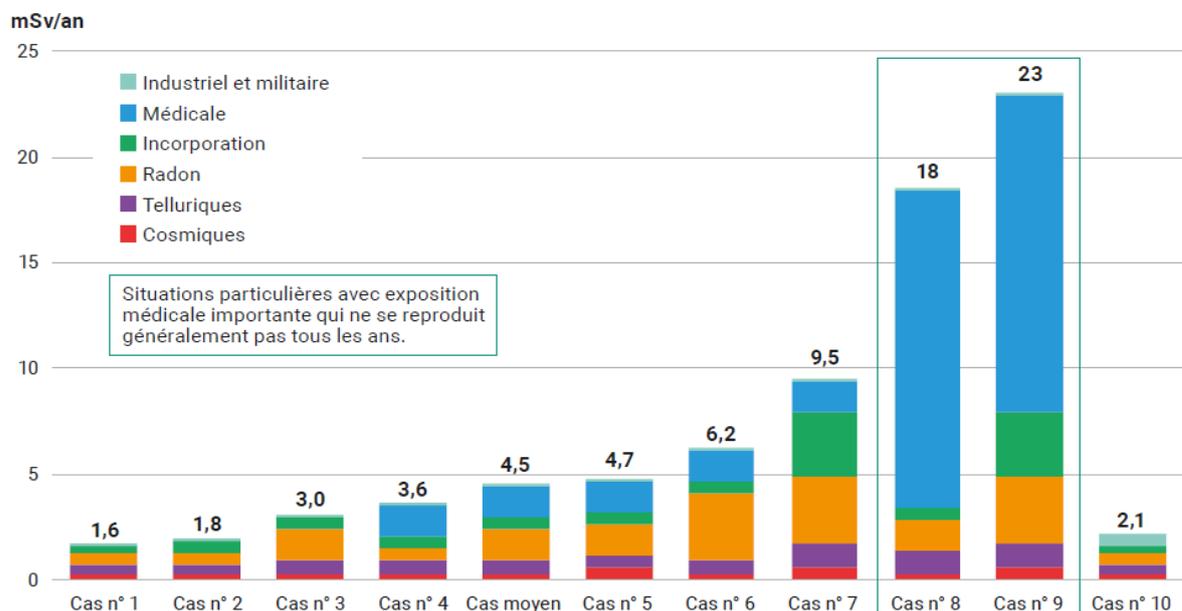


Figure 18 – Variabilité de l'exposition de la population française. (45)

4. Grandeurs utilisées en radiothérapie

a. Dose absorbée

L'unité utilisée par le Système international (SI) est le gray (Gy).

C'est une grandeur physique valable quelle que soit la nature du rayonnement et de la matière absorbante.

Elle correspond à la quantité d'énergie cédée par un rayonnement.

Elle ne permet pas d'évaluer pleinement les effets biologiques (comme la mort cellulaire ou les mutations), car à doses absorbées égales, les effets varient selon plusieurs facteurs :

- La nature des rayonnements, qui sont plus ou moins efficaces pour provoquer des lésions ;
- La sensibilité du tissu exposé à ces rayonnements ;
- Le débit et le fractionnement de la dose ;
- La répartition spatiale de la dose absorbée dans le tissu concerné.

b. Dose engagée

L'unité utilisée est le gray (Gy).

Elle s'applique aux personnes ayant absorbé un radionucléide. Une fois absorbé par l'organisme, chaque élément chimique adopte un comportement spécifique qui lui est propre.

Certains éléments se fixent dans des organes comme le calcium (Ca) ou le strontium (Sr) dans l'os, l'iode (I) dans la thyroïde alors que d'autres comme le carbone (C), l'hydrogène (H) ou le césium (Cs) n'ont pas de fixation préférentielle.

c. Période biologique

Il s'agit du délai nécessaire pour éliminer la moitié de l'élément absorbé. Si la période biologique et la période radioactive sont prolongées, l'individu sera exposé à une irradiation tout au long de sa vie.

d. Efficacité biologique relative (EBR)

Elle permet d'apprécier l'efficacité d'un rayonnement à produire un effet biologique ou pathologique donné.

5. La survie

Elle peut être représentée par une courbe qui exprime la relation entre la proportion de cellules survivantes et la dose (D).

Elle dépend de la dose létale moyenne (D_0), c'est-à-dire la dose pour laquelle la proportion de cellules survivantes est de 37 %. Elle permet d'apprécier la radiosensibilité des cellules.

L'ordre de grandeur de D_0 est d'environ 1 Gy.

6. Grandeurs utilisées en radioprotection

Ces grandeurs permettent d'estimer les effets nocifs des irradiations chez l'Homme en tenant compte de la dose absorbée, des caractéristiques de chaque rayonnement et de la sensibilité des différents tissus irradiés.

a. Dose équivalente (Ht)

L'unité utilisée est le sievert (Sv) [Figure 19].

La dose équivalente est définie comme le produit de la dose absorbée moyenne dans un organe ou un tissu par un facteur de pondération qui varie en fonction du type de rayonnement [Figure 20].

Elle permet de connaître l'impact d'un rayonnement bien précis.

b. Dose efficace (E)

L'unité utilisée est le sievert (Sv).

Elle représente la somme des doses équivalentes reçues par chaque organe ou tissu, pondérée par un facteur spécifique dépendant du type de tissu concerné.

Elle permet donc de connaître l'impact des différents rayonnements sur un organe ou tissu précis.

La dose efficace a des limites : les facteurs tissulaires ne sont pas constants et varient avec la dose. Elle est utilisable pour des doses de 0,5 Gy à quelques gray.

Les unités de mesure de la radioactivité

Certaines matières sont radioactives : elles émettent des rayonnements avec plus ou moins d'énergie. Pour mesurer précisément la radioactivité, on utilise 3 unités de mesure complémentaires : le becquerel, le gray et le sievert.

L'activité d'une source

Bq Le nombre de **becquerels** correspond au nombre de fois par seconde où la source émet un rayonnement. Plus son nombre est grand, plus l'activité de la source est grande.

La dose reçue

Gy Le **gray** est utilisé pour mesurer l'énergie due à la quantité de rayonnement reçue. On parle alors de dose reçue.

La dose efficace

Sv Le **sievert** est la mesure de la dangerosité. Lorsqu'il s'agit spécifiquement du corps humain, les effets des différents rayonnements varient selon les organes ou tissus touchés. Certains sont plus sensibles que d'autres.

LORSQU'ON COMPARE UN POMMIER À UNE SOURCE RADIOACTIVE

Le nombre de pommes qui tombent de l'arbre se mesure en **becquerel (Bq)**.

La dose de pommes tombant sur la tête de la personne sous l'arbre se mesure en **gray (Gy)**.

Les effets de l'impact des fruits sur le corps de la personne se mesurent en **sievert (Sv)**.

www.irsn.fr

Figure 19 - Les unités de mesure de la radioactivité. (46)



Figure 20 - Les concepts de doses. (47)

7. Détection des rayonnements nucléaires

Il n'est pas possible pour l'Homme de détecter, à travers les cinq sens, les rayonnements émis par les substances radioactives.

Il est donc nécessaire d'employer des méthodes de détection utilisant les formes d'interaction entre les rayonnements ionisants et la matière que sont l'ionisation et l'excitation.(48)

Détecter, ce n'est pas mesurer. La détection permet d'affirmer ou d'infirmer la présence de rayonnements alors que la mesure implique une quantification (nombre de rayonnements, énergie des rayonnements, dose, etc.).

a. Le dosimètre

Il s'agit d'un dispositif légal permettant de mesurer les équivalents de dose absorbée par un travailleur, tant au niveau de la peau qu'en profondeur.

Les travailleurs exposés aux rayonnements doivent porter des dosimètres photographiques individuels (Code du travail, Art. R. 4451-65).

Ces dosimètres sont portés à la hauteur de la poche poitrine pendant les heures de travail et sont entreposés dans un endroit spécifique, le moins exposé possible aux radiations, lorsqu'ils ne sont pas utilisés. Ils sont relevés tous les mois.

Dans la plupart des cas, un film témoin est utilisé pour comparer les niveaux d'exposition.

Les rayonnements ionisants ont la capacité de noircir les émulsions photographiques argentiques des films de dosimètres. L'analyse de chaque film permet de déterminer la dose absorbée en mesurant l'absorbance du film.

Il existe une plage linéaire où l'absorbance est directement proportionnelle à la dose absorbée. Cela se manifeste de la manière suivante :

- Pour de faibles doses absorbées, un voile apparaît, correspondant au seuil minimal de sensibilité du film utilisé, qui se situe autour de 0,2 mSv pour les rayonnements β et γ ;
- Pour des doses absorbées élevées, un phénomène de saturation survient, rendant impossible la détermination précise de la dose absorbée réelle.

Le principal inconvénient du dosimètre photographique réside dans la limitation de sa plage d'utilisation, qui est restreinte à la zone linéaire comprise entre le seuil de sensibilité et la saturation.

Les dosifilms (dosimètres photographiques) peuvent être remplacés par des dosimètres utilisant la lecture d'une émission lumineuse par le détecteur irradié.

Il existe enfin des dosimètres électroniques dont le choix dépend du type de rayonnements auquel les travailleurs peuvent être exposés dans leur activité professionnelle ainsi que de l'énergie de ces rayonnements. Ces dosimètres permettent d'obtenir en temps réel les doses et débits de doses. Ils peuvent même être équipés d'alarme en cas de dépassement des seuils réglementaires et peuvent être lus à distance par télétransmission.

Habituellement, distinction est faite entre :

- Dosimètre de référence dit « passif » qui enregistre la dose cumulée sur une période d'utilisation prédéfinie ; un mois par exemple. Ces dosimètres permettent de mesurer l'exposition liée aux rayonnements β , X et γ . Après leur période d'utilisation, les dosimètres sont analysés en laboratoire pour définir la dose efficace reçue sur la période donnée ;
- Dosimètre opérationnel dit « actif » qui permet de mesurer en temps réel l'exposition du travailleur.

Les dosimètres sont individuels, nominatifs et ne doivent pas gêner les salariés dans leur activité professionnelle.

Ils sont portés sous les équipements de protection individuelle :

- A la poitrine (ou à défaut, à la ceinture) pour l'évaluation de la dose efficace ;
- Au plus près de l'organe ou du tissu exposé, pour l'évaluation des doses équivalentes.

b. Compteur Geiger-Müller

Ce compteur ne permet que des dénombrements de rayonnements. L'enceinte du compteur contient un gaz rare, comme l'argon (Ar) et le xénon (Xe).

Il s'agit d'un détecteur extrêmement sensible, utilisé de manière polyvalente, à l'exception des neutrons, et à bas coût. Il permet de détecter des particules de très faible énergie. Il est toutefois inutilisable pour les forts taux de comptage.

8. Cas des faibles doses

L'IRSN définit les faibles doses comme toutes doses reçues inférieures à 100 mSv.an⁻¹.(49)

Ces faibles doses correspondent au seuil au-dessus duquel, selon les études menées chez les 90 000 survivants de HIROSHIMA et NAGASAKI, le risque de cancer augmente de manière significative.

Les études ont montré des risques pour la santé même à faible dose, mais ces résultats précisait que le cumul de doses importait davantage que les doses reçues elles-mêmes.

9. Réglementation

La radioprotection tire ses origines de la fondation du Comité international de protection contre les rayons X et le radium en 1928, appelé aujourd'hui Commission internationale de protection radiologique (CIPR).(50)

L'utilisation des sources radioactives et des rayonnements ionisants est aujourd'hui strictement encadrée et contrôlée.

Les règles de radioprotection sont établies au niveau international par des organismes et comités d'experts affiliés aux Nations Unies (NU) ou à l'Union Européenne (UE).

Ces organismes sont généralement responsables de la sécurité des installations nucléaires. En FRANCE, l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN) veille au respect des règles de radioprotection, tandis que l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) est chargé de l'expertise, de l'évaluation des risques, de la métrologie et de la recherche.

Ces deux institutions vont fusionner suite à la loi du 21 mai 2024 pour mener à la création en 2025 d'une nouvelle entité : l'Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection (ASNR).

Leur action comprend :

- La prévention de tout accident en lien avec la radioactivité ;
- La limitation de l'impact des installations nucléaires sur l'environnement ;
- La protection du public contre le danger des rayonnements ionisants ;
- La protection des travailleurs ;
- La gestion des déchets radioactifs¹⁸.

c. Acteurs de la radioprotection

Les règles de la radioprotection sont issues de directives internationales édictées par des organismes rattachés aux Nations Unies (NU) ou à l'Union Européenne (UE) qui ensuite formulent des normes, standards ou recommandations.

Divers acteurs contribuent à l'élaboration des règles de radioprotection ainsi qu'à la définition de leur cadre juridique [Figure 21].

¹⁸ Mission déléguée à l'Agence Nationale pour la gestion des Déchets RadioActifs (ANDRA).

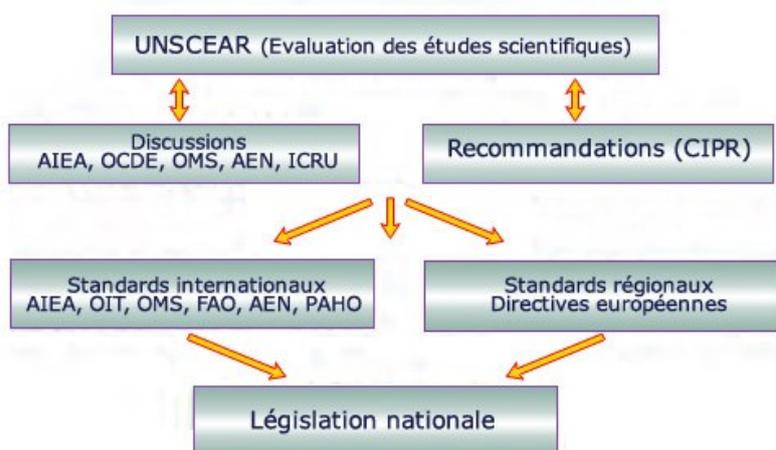


Figure 21 - Élaboration des règles de radioprotection.(50)

Les directives et normes fondamentales de radioprotection s'appuient sur les évaluations issues des études scientifiques menées par l'UNSCEAR¹⁹, ainsi que sur les recommandations de la CIPR.

L'UNSCEAR collabore avec différentes organisations internationales spécialisées dans de multiples domaines comme la santé (via l'OMS²⁰), l'économie (via l'OCDE²¹), le nucléaire (via l'AEN²² par exemple).

Ces directives et normes sont ensuite débattues à l'échelle internationale par des institutions majeures telles que l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique (AIEA), l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), l'Organisation internationale du travail (OIT) et l'Organisation mondiale de la santé (OMS), ainsi qu'au niveau européen par EURATOM²³, afin de produire des standards régionaux comme les directives européennes, qui finissent par être intégrées dans la législation nationale.

¹⁹ Comité scientifique des Nations unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants, VIENNE.

²⁰ Organisation Mondiale de la Santé, PREGNY-CHAMBESY.

²¹ Organisation de Coopération et de Développement Economiques, PARIS.

²² Agence pour l'Énergie Nucléaire, BOULOGNE-BILLANCOURT.

²³ Communauté européenne de l'énergie atomique, ROME.

d. Limites légales françaises

La réglementation encadrant la protection des travailleurs contre les risques liés aux rayonnements ionisants est inscrite dans le Code du travail (art. L. 4451-1 et suivants ; art. R. 4451-1 et suivants) ainsi que dans le Code de la santé publique (art. L. 1333-1 et suivants) et dans le Code de l'environnement (art. L. 591-1 et suivants).

En FRANCE, pour la population générale, la dose efficace maximale « corps entier » annuelle est fixée à 1 mSv.an^{-1} . Ce seuil ne tient pas compte de la radioactivité naturelle ni des doses reçues pour raison médicale.(51)

Il existe également des normes dépendant des organes ou tissus :

- La dose équivalente maximale pour le cristallin est fixée à 15 mSv.an^{-1} ;
- La dose équivalente maximale pour la peau est fixée à 50 mSv.an^{-1} .

En ce qui concerne les professionnels travaillant au contact des rayonnements ionisants, les standards internationaux fixent une limite à un total cumulé de 100 mSv sur cinq années consécutives, alors que les recommandations des mêmes instances proposent une limite de 50 mSv.an^{-1} .

La réglementation française est plus stricte et impose une limite de 20 mSv.an^{-1} pour les travailleurs susceptibles d'être les plus exposés aux rayonnements ionisants (personnels de catégorie A). [Tableau 5].

	Corps entier (dose efficace)	Extrémités : mains, avant-bras, pieds, chevilles (dose équivalente)	Peau (dose équivalente sur tout cm ² , quelle que soit la surface exposée)	Cristallin (dose équivalente)
Travailleurs	20 mSv	500 mSv	500 mSv	20 mSv
Jeunes travailleurs (entre 16 et 18 ans, sous réserve d'y être autorisés pour les besoins de leur formation)	6 mSv	150 mSv	150 mSv	15 mSv
Femmes enceintes	Dose équivalente à l'enfant à naître inférieure à 1 mSv, de la déclaration de la grossesse à l'accouchement			
Femme allaitant	Interdiction de les maintenir ou de les affecter à un poste entraînant un risque d'exposition interne			

Tableau 5 - Valeurs limites d'exposition en mSv sur 12 mois consécutifs.(52)

L'article D. 4154-1 du Code du travail interdit l'emploi de salariés temporaires ou en contrat à durée déterminée (CDD) pour des travaux exposant aux rayonnements ionisants dont la dose efficace susceptible d'être reçue peut atteindre ou dépasser les 2 mSv.h⁻¹.

De plus, l'article L. 1243-12 du Code du travail prévoit que lorsqu'un salarié en CDD est exposé à des rayonnements ionisants et qu'au terme de son contrat de travail les valeurs d'exposition dépassent les valeurs limites annuelles rapportées à la durée du contrat, l'employeur se voit dans l'obligation de proposer une prolongation du CDD pour que l'exposition constatée soit tout au plus égale à la valeur limite annuelle rapportée à la durée totale du contrat.

e. Réglementation internationale

L'Agence Internationale de l'Energie Atomique (IAEA) a défini, en 2016, une réglementation internationale dans la partie 3 de ses Prescriptions générales de sûreté (53).

Pour les travailleurs exposés aux rayonnements ionisants et âgés de plus de 18 ans :

- Corps entier : dose efficace moyenne de 20 mSv.an^{-1} sur cinq années consécutives (soit maximum 100 mSv sur cinq ans) et dose efficace maximale annuelle de 50 mSv ;
- Cristallin : dose équivalente moyenne de 20 mSv.an^{-1} sur cinq années consécutives (soit maximum 100 mSv sur cinq ans) et dose équivalente maximale annuelle de 50 mSv ;
- Extrémités (mains, pieds) et peau : dose équivalente maximale de 500 mSv.an^{-1} .

Pour les apprentis et étudiants, entre 16 et 18 ans, suivant une formation les exposant aux rayonnements ionisants :

- Corps entier : dose efficace maximale de 6 mSv.an^{-1} ;
- Cristallin : dose équivalente maximale de 20 mSv.an^{-1} ;
- Extrémités (mains, pieds) et peau : dose équivalente maximale de 150 mSv.an^{-1} .

Pour la population générale²⁴ :

- Corps entier : dose efficace maximale de 1 mSv.an^{-1} ;
- Cristallin : dose équivalente maximale de 15 mSv.an^{-1} ;
- Peau : dose équivalente maximale de 50 mSv.an^{-1} .

²⁴ Population qui n'appartient pas aux catégories de travailleurs exposés précédemment citées.

f. Critères de mise en œuvre au sein des entreprises

L'article R. 4451-111 du Code du travail encadre la radioprotection en milieu de travail. Il impose à l'employeur sa mise en place dès lors qu'au moins un des trois critères suivants est rempli :

- Avoir des salariés classés en catégorie A ou B, selon l'article R. 4451-57 du Code du travail ;
- Avoir au moins une zone de travail à accès réglementé en fonction des conditions fixées par les articles R. 4451-22 et R. 4451-28 du Code du travail ;
- Avoir des équipements émetteurs de rayonnements ionisants nécessitant des vérifications initiales et/ou périodiques selon les articles R. 4451-40 et suivants du Code du travail.

L'organisation de la radioprotection en entreprise repose sur la désignation, par l'employeur, d'un conseiller en radioprotection²⁵ (CRP).

Le CRP assiste et conseille l'employeur en ce qui concerne l'organisation et la mise en œuvre de la prévention, l'analyse des risques, le zonage des activités. Depuis 2018, ses missions ne concernent plus uniquement la protection des travailleurs, mais aussi celle de la population et de l'environnement.

²⁵ Anciennement : personne compétente en radioprotection (PCR), modifié par le Décret n°2018-437 du 4 juin 2018.

Ce conseiller peut être (art. l'article R4451-112 du Code du travail) :

- Une personne physique salariée de l'établissement ou à défaut de l'entreprise, dénommée « personne compétente en radioprotection » ;
- Une personne morale, dénommée « organisme compétent en radioprotection ».

g. Classification professionnelle des travailleurs

Avant d'affecter un travailleur à un poste exposé aux rayonnements ionisants, une évaluation individuelle de son exposition doit être réalisée. Cette évaluation vise à estimer la dose efficace et les doses équivalentes que le travailleur pourrait recevoir au cours des 12 prochains mois. Elle prend en compte l'ensemble des tâches impliquant une exposition aux rayonnements, la variabilité des pratiques, les incidents prévisibles liés au poste de travail, ainsi que les expositions potentielles qui en découlent.

Les résultats de cette évaluation servent à déterminer les modalités de classement, de formation, ainsi que le suivi du travailleur, incluant la surveillance dosimétrique et le suivi individuel de son état de santé.

Les travailleurs exposés sont classés en deux catégories, sur la base des résultats de l'évaluation individuelle réalisée par l'employeur. Conformément à l'article R. 4451-57 du Code du travail, les travailleurs sont classés en catégorie A s'ils sont susceptibles de recevoir, sur une période de 12 mois consécutifs :

- Une dose efficace supérieure à 6 mSv ;
- Et/ou une dose équivalente supérieure à 150 mSv pour la peau et/ou les extrémités.

Tous les autres travailleurs sont classés en catégorie B s'ils sont susceptibles de recevoir, sur 12 mois consécutifs :

- Une dose efficace supérieure à 1 mSv ;
- Et/ou une dose équivalente supérieure à 15 mSv pour le cristallin et/ou à 50 mSv pour la peau et/ou les extrémités.

L'employeur doit consulter le médecin du travail pour obtenir un avis sur le classement, et actualiser ce classement en fonction, notamment, de l'avis médical d'aptitude du salarié, des conditions de travail et des résultats de la surveillance de l'exposition.

Les travailleurs bénéficient d'une surveillance dosimétrique individuelle adaptée à leur mode d'exposition. Par ailleurs, les femmes enceintes et les jeunes travailleurs âgés de 16 à 18 ans sont réglementairement exclus des travaux nécessitant un classement en catégorie A.

h. Identification et délimitation des zones

L'identification des zones se base sur l'évaluation des niveaux d'exposition de chacune d'entre elles, le lieu de travail devant être occupé de manière permanente (2 000 h par an ou 170 h par mois) [Figure 22].

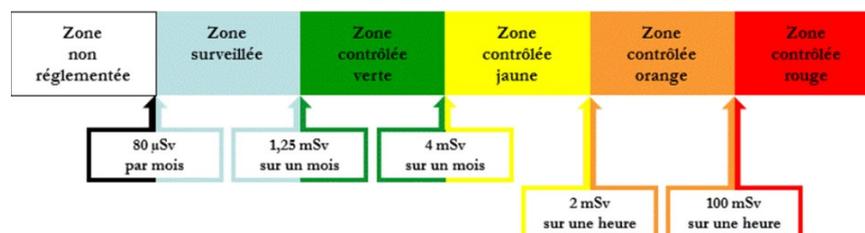


Figure 22 – Délimitation des zones en fonction du risque radiologique.(52)

i. Conditions d'accès aux zones réglementées

L'accès aux zones réglementées n'est permis qu'aux travailleurs ayant une autorisation de l'employeur et remplissant des conditions de formation et de surveillance dosimétrique, notamment. [Tableau 6].

Zone	Travailleurs classés (A ou B)	Travailleurs non classés
Surveillée	Autorisation de l'employeur ²⁶ Formation Surveillance dosimétrique	Autorisation de l'employeur Information adaptée
Contrôlée verte	Autorisation de l'employeur Formation Surveillance dosimétrique	Autorisation de l'employeur Information adaptée au salarié Port d'un dosimètre actif
Contrôlée jaune	Autorisation de l'employeur Formation Surveillance dosimétrique	Autorisation de l'employeur Justification préalable à l'accès Information renforcée Port d'un dosimètre actif
Contrôlée orange	Autorisation individuelle par l'employeur Formation Surveillance dosimétrique	Accès non autorisé
Contrôlée rouge	Autorisation individuelle par l'employeur Accès exceptionnel Formation Surveillance dosimétrique Enregistrement nominatif à chaque entrée	Accès non autorisé

Tableau 6 – Conditions d'accès en zones réglementées pour les travailleurs. (52)

En ce qui concerne les salariés non classés, il est du rôle de l'employeur de veiller à ce que leur exposition aux rayonnements ionisants reste sous les limites de doses fixées par la réglementation qui encadre les travailleurs non exposés au risque radiologique.

²⁶ Le classement en catégorie A ou B fait office d'autorisation de l'employeur.

j. Signalisation

Que ce soit lors de leur stockage, de leur utilisation ou encore de leur transport, les sources de rayonnements ionisants doivent être signalées visuellement. [Figure 23].



Figure 23 - Pictogramme d'avertissement : matières radioactives / rayonnements ionisants.(52)

La limitation des zones réglementées (zones surveillées et zones contrôlées) doit être correctement matérialisée et signalée. [Figures 24 à 29].



Figure 24 - Panneau de signalisation de zone surveillée (bleue).(52)



Figure 25 - Panneau de signalisation de zone contrôlée (verte).(52)

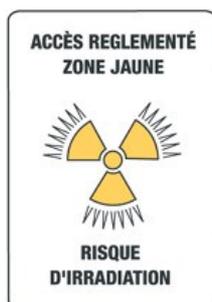


Figure 26 - Panneau de signalisation de zone contrôlée (jaune).(52)



Figure 27 - Panneau de signalisation de zone contrôlée (orange).(52)

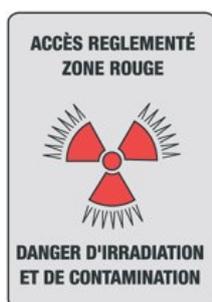


Figure 28 - Panneau de signalisation de zone contrôlée (rouge).(52)



Figure 29 - Panneau de signalisation de zone extrémité.(52)

Un affichage obligatoire en entreprise doit être régulièrement mis à jour, rappelant les risques liés aux expositions (externes et au besoin internes), les consignes de travail adaptées au type d'exposition et à la nature des travaux effectués, ainsi que les consignes en cas d'urgence.

La réglementation fixe les règles de signalisation (forme, couleur, dimension ou encore emplacement) et il revient à l'employeur d'adapter ces règles à son entreprise en tenant compte de la réalité du terrain.

10. Rôle du médecin du travail et risque « rayonnements ionisants »

Tous les travailleurs classés, qu'ils soient en catégorie A ou B, doivent bénéficier d'un suivi individuel renforcé (SIR) par la médecine du travail.(54)

La classification des salariés en SIR impose obligatoirement un examen médical d'aptitude à l'embauche, réalisé par un médecin du travail, avant que le travailleur ne commence son activité. Pour les salariés classés en catégorie A, cet examen médical d'aptitude doit être effectué chaque année. Pour ceux de la catégorie B, la fréquence de l'examen est fixée par le médecin du travail, mais ne peut dépasser un intervalle de quatre ans entre deux visites. Entre ces examens, une visite intermédiaire doit être réalisée par un professionnel de santé au

travail (médecin du travail, interne en médecine du travail, médecin collaborateur ou infirmier en santé au travail), au plus tard deux ans après le dernier examen d'aptitude, et une attestation de suivi doit être délivrée. Ces examens médicaux permettent de statuer sur l'aptitude du salarié.

Le médecin du travail a accès aux valeurs dosimétriques de chaque salarié qu'il suit en santé au travail. Dans le cadre de la prévention, il peut communiquer à la PCR des éléments en lien avec l'exposition professionnelle d'un travailleur et relatifs à l'exposition interne, même si ceux-ci sont couverts par le secret médical.

Enfin, les salariés classés en SIR, ou ayant à un moment de leur cursus professionnel été exposés à des risques particuliers, doivent bénéficier d'une visite médicale en santé au travail avant leur départ à la retraite : la visite de fin de carrière. Au cours de cette visite, le médecin du travail établit une liste des expositions professionnelles dites de pénibilité²⁷ auxquelles le salarié a été exposé tout au long de sa carrière.

Du fait du risque rayonnements ionisants inscrit dans le dossier médical de santé au travail, le salarié exposé peut bénéficier d'un suivi post-professionnel que le médecin du travail met en place en collaboration avec le médecin traitant du salarié et le médecin conseil de la Sécurité sociale.

Une attestation d'exposition professionnelle aux rayonnements ionisants est établie conjointement par le médecin du travail et l'employeur, et remise au salarié.

²⁷ Les rayonnements ionisants ne font pas partie de ces facteurs de risque d'exposition dits de pénibilité ; pourtant il s'agit d'un risque pour lequel le suivi post-professionnel est capital en raison des effets sanitaires qui lui sont liés.

En application du décret du 21 juin 2023²⁸, les professionnels de santé au travail²⁹ en charge du SIR des travailleurs exposés aux rayonnements ionisants doivent être formés sur ce risque. Les professionnels de santé n'ayant pas suivi cette formation au 1^{er} janvier 2026 ne pourront plus assurer le suivi de ces salariés. Les modalités de la formation sont précisées dans l'arrêté du 6 août 2024³⁰.

²⁸ Décret n° 2023-489 du 21 juin 2023 relatif à la protection des travailleurs contre les risques dus aux rayonnements ionisants.

²⁹ Médecins du travail, médecins collaborateurs, internes en santé au travail et infirmiers en santé au travail.

³⁰ Arrêté du 6 août 2024 relatif à la formation des médecins du travail et des autres professionnels de santé au travail assurant le suivi individuel renforcé d'un travailleur exposé aux rayonnements ionisants et aux conditions de délivrance de l'agrément complémentaire des services de santé au travail.

III. Le radium et son utilisation professionnelle

Le radium, qui a été découvert par Marie et Pierre CURIE à la fin du XIXe siècle, est un élément chimique majeur de la physique, de la chimie, mais aussi de la médecine avec les débuts de la radiothérapie moderne.

Toutefois, ce métal radioactif et luminescent est également connu pour être une source de dangers pour la santé humaine.

A. Histoire et propriétés du radium

1. Découverte du radium

La découverte du radium en 1898 par Marie et Pierre CURIE est l'une des avancées scientifiques majeures de la fin du XIXe siècle. Le contexte scientifique de l'époque était marqué par les travaux de Henri BECQUEREL, qui avait découvert en 1896 que l'uranium émettait des rayonnements invisibles capables de noircir une plaque photographique. Fascinée par cette découverte, Marie CURIE réalisa une étude sur la pechblende, un minerai d'uranium, qui lui permit de découvrir que ce minerai émettait une radioactivité beaucoup plus intense que celle de l'uranium pur. Cette observation suggérant la présence d'un autre élément radioactif.

Après plusieurs mois d'extraction chimique et de purification, les CURIE isolèrent une nouvelle substance, qu'ils baptisèrent radium, en raison de l'intensité des rayonnements émis.(55)

Les travaux des CURIE sur le radium leur permirent d'obtenir le prix NOBEL de physique en 1903, partagé avec Henri BECQUEREL, en reconnaissance de leurs contributions à l'étude des radiations.(56)

Dès lors, la découverte du radium ouvrit la voie à l'exploration des propriétés des éléments radioactifs et à la compréhension de la radioactivité en tant que phénomène naturel. Le radium, par sa radioactivité intense, permit de confirmer que certains éléments pouvaient se désintégrer spontanément en émettant de l'énergie sous forme de rayonnements. Cela déboucha sur la théorie de la radioactivité, qui fut ensuite développée par des scientifiques comme Ernest RUTHERFORD³¹ et Frederick SODDY³².(57)

Le radium joua un rôle central dans le développement de la radiothérapie, une technique qui révolutionna le traitement des cancers. Les propriétés de pénétration des rayonnements émis par le radium furent rapidement exploitées pour détruire les tissus cancéreux, bien que les dangers associés à une exposition prolongée au radium n'étaient alors pas encore connus. La découverte du radium et ses applications ont donc eu un impact durable non seulement sur la science, mais aussi sur la médecine moderne.(58)

³¹ Prix NOBEL de chimie en 1908.

³² Prix NOBEL de chimie en 1921.

2. Propriétés physiques et chimiques

Le radium est un métal alcalino-terreux de numéro atomique 88, situé dans le groupe 2 du tableau périodique.

À l'état pur, il est blanc argenté, mais il s'oxyde rapidement à l'air et noircit, formant une couche de radon. Le radium est l'un des éléments les plus radioactifs connus, émettant principalement des rayonnements α , mais aussi des rayonnements β et γ , ce qui en fait une substance particulièrement dangereuse. Sa radioactivité est si intense qu'elle est environ un million de fois plus forte que celle de l'uranium, ce qui en fait une source d'énergie potentielle, mais aussi une menace importante pour la santé humaine.(56)

Chimiquement, le radium forme des sels courants comme le chlorure de radium (RaCl_2), qui est soluble dans l'eau. En raison de leur radioactivité, ces sels peuvent être luminescents, une propriété qui a été largement exploitée dans l'industrie pour produire des peintures luminescentes utilisées sur les cadrans de montres, les instruments de navigation et autres dispositifs nécessitant une visibilité dans l'obscurité.(56,58)

La luminescence du radium est due à l'énergie libérée par la désintégration radioactive, qui excite les électrons des matériaux environnants, provoquant une émission de lumière visible. Cette propriété a été largement utilisée au début du XXe siècle, avant que les dangers de l'exposition à long terme au radium ne soient pleinement compris.

Le radium émet principalement des particules α , qui sont lourdes et chargées positivement.

Bien que ces particules aient une faible capacité de pénétration, elles peuvent causer des dommages importants aux tissus vivants s'ils sont ingérés ou inhalés.

Le radium émet également des particules β et des rayons γ , qui ont une plus grande capacité de pénétration et posent des risques graves pour la santé même à distance.(59)

B. Sources et voies d'exposition au radium, focus sur le milieu hospitalier

1. Sources naturelles et anthropiques du radium

Le radium est présent naturellement dans la croûte terrestre, où il se forme à partir de la désintégration de l'uranium et du thorium. On le trouve dans des concentrations faibles dans certains types de roches, notamment les granites et les schistes. Les eaux souterraines peuvent également contenir du radium, surtout dans les régions où ces roches sont présentes en abondance.

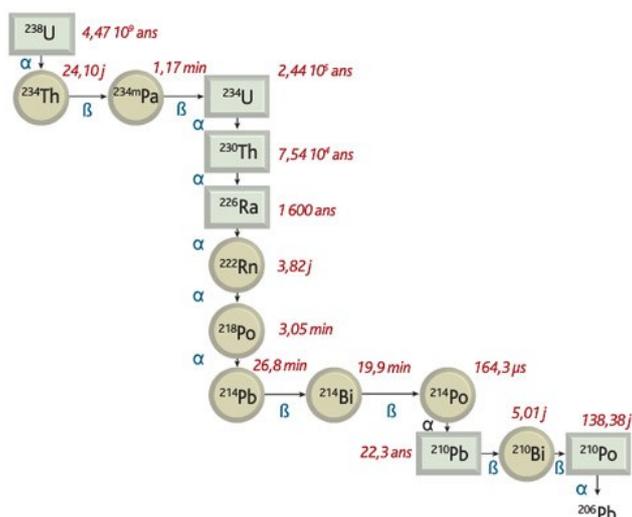


Figure 30 – Production du radium à partir de l'uranium.(60)

L'activité humaine, et notamment l'exploitation minière, a conduit à la dispersion du radium dans l'environnement. Par exemple, l'exploitation de l'uranium et la production d'engrais phosphatés peuvent libérer du radium dans l'air, l'eau, et le sol.(56,61,62)

Les sources anthropiques du radium comprennent également son utilisation dans diverses industries au début du XXe siècle, notamment dans la fabrication de peintures luminescentes pour les cadrans de montres et d'instruments. Bien que ces pratiques aient été abandonnées, les sites de production historiques peuvent encore représenter des risques de contamination résiduelle.(62)

2. Voies d'exposition au radium

a. Inhalation, ingestion et contact cutané

Le radium peut s'inhaler lorsqu'il est sous forme de poussières en suspension dans l'air.

A l'état pur, il n'est habituellement pas inhalable mais le radon, gaz radioactif, qui est un produit de désintégration du radium peut s'accumuler dans les espaces clos comme les sous-sols, les mines et certaines installations industrielles.(61,63)

L'ingestion de radium peut se produire par la consommation d'eau ou d'aliments contaminés, en particulier dans les régions où les eaux souterraines sont en contact avec des formations géologiques riches en radium. Une fois ingéré, le radium se fixe principalement dans les os, où il peut rester actif pendant des décennies, émettant des rayonnements qui endommagent les cellules osseuses et la moelle osseuse.

Le contact cutané avec du radium est moins courant, mais peut se produire lors de la manipulation directe de radium ou de matériaux contaminés sans protection adéquate. Ce type d'exposition était particulièrement fréquent parmi les travailleurs qui manipulaient du radium dans des industries comme la fabrication de cadrans de montres.(59,62)

b. Exemples de professions à risque

Les professions les plus à risque d'exposition au radium comprennent les mineurs d'uranium, les professionnels de santé de radiologie et d'oncologie, et les employés des industries historiques de la peinture luminescente.(58)

3. En milieu industriel

a. L'industrie horlogère

Dès les années 1910, l'industrie horlogère a adopté le radium, sous forme de peinture, pour la fabrication de montres luminescentes, cette innovation permettait enfin de lire l'heure dans l'obscurité.

La peinture au radium, appliquée sur les aiguilles et les chiffres des cadrans, émettait une lumière verdâtre caractéristique qui rendait ces montres particulièrement utiles dans des conditions de faible luminosité.

Des jeunes femmes, surnommées les « *Radium Girls* », travaillaient dans des ateliers où elles appliquaient manuellement cette peinture radioactive. À cette époque, alors que l'on ignorait les dangers associés à l'exposition prolongée au radium, il était courant qu'elles utilisent leurs lèvres pour affiner la pointe des pinceaux, ingérant ainsi de petites quantités de radium.(64)

Les effets néfastes de cette exposition répétée ne se sont manifestés que plus tard, avec l'apparition de graves pathologies telles que des cancers osseux et des nécroses de la mâchoire.

b. L'instrumentation scientifique

Au-delà de l'industrie horlogère, le radium a trouvé des applications dans le domaine de l'instrumentation scientifique, où ses propriétés radioactives étaient particulièrement utiles. Au début du XXe siècle, le radium était couramment utilisé comme source de rayonnement dans divers instruments de mesure. Les électroscopes, par exemple, utilisaient le radium pour détecter la présence de rayonnements ionisants, jouant un rôle crucial dans les premières études sur la radioactivité.(56)

De plus, en raison de sa capacité à émettre de la chaleur de manière continue, le radium a été utilisé dans des dispositifs thermiques, comme les microcalorimètres, pour mesurer des variations infinitésimales de température.

Le radium a également été utilisé dans des domaines plus spécialisés, tels que la fabrication de balises radioactives pour des expériences nécessitant des sources de rayonnement constantes et fiables.(65)

4. Applications militaires

Le potentiel du radium a rapidement été exploité dans le domaine militaire, en particulier pendant les deux guerres mondiales.

Au cours de la Première Guerre Mondiale (1914-1918), des dispositifs contenant du radium ont été utilisés à grande échelle dans les instruments de navigation, ainsi que dans les dispositifs de visée nocturne.

Pendant la Seconde Guerre Mondiale (1939-1945), cette utilisation s'est étendue, avec l'emploi du radium dans les instruments d'avionique pour les avions de combat, les jauges et les compas, permettant une navigation précise même en l'absence de lumière.

En parallèle, le radium a été au centre de nombreuses recherches scientifiques qui ont directement contribué au développement des technologies nucléaires.

Les recherches menées par les physiciens dans les années 1930 et 1940, inspirées par les propriétés du radium, ont joué un rôle clé dans la mise au point des premières armes nucléaires.(66)

5. En milieu hospitalier

a. La radiothérapie

L'une des premières applications médicales du radium a été la radiothérapie, utilisée pour traiter divers types de cancers. Dès les années 1900, les médecins ont développé des techniques de radiothérapie interne utilisant le radium pour détruire les cellules cancéreuses. Cette méthode, appelée curiethérapie³³, impliquait l'insertion de petites quantités de radium directement dans les tumeurs ou à proximité de celles-ci. L'objectif était de cibler les cellules malignes par irradiation tout en réduisant au maximum les dommages aux tissus sains avoisinants. Ce traitement a montré une certaine efficacité, en particulier pour les cancers du col de l'utérus et les cancers de la peau, et est resté une méthode de traitement standard pendant plusieurs décennies.(67)

³³ Hommage à Marie CURIE.

b. Le diagnostic médical

Le radium a également été utilisé dans le diagnostic médical. Au début du XXe siècle, des produits radiopharmaceutiques à base de radium ont été développés pour améliorer la qualité des images radiographiques. Ces produits permettaient de mieux visualiser certaines structures internes du corps, telles que les os et les organes, en augmentant le contraste sur les radiographies.(68)

c. Déclin de l'utilisation du radium en médecine

i. Introduction de technologies alternatives et plus sûres

À partir des années 1950, l'utilisation du radium en médecine a commencé à décliner en raison de l'introduction de technologies alternatives plus sûres. Le cobalt 60 (^{60}Co) et le césium 137 (^{137}Cs), deux isotopes radioactifs introduits dans les années 1950, se sont révélés être des alternatives plus efficaces et plus faciles à manipuler que le radium pour la radiothérapie. Ces isotopes permettaient une meilleure précision dans la délivrance des doses de radiation, réduisant ainsi les effets secondaires pour les patients et les risques pour le personnel médical.(69) Enfin, l'émergence de la radiothérapie externe, qui permettait de traiter les tumeurs sans introduire de sources radioactives directement dans le corps du patient, a contribué à l'abandon progressif du radium en médecine.(70)

ii. Evolution des protocoles médicaux et de la réglementation

Parallèlement aux avancées technologiques, les protocoles médicaux et la réglementation ont évolué pour réduire l'exposition aux radiations. Les autorités de santé, conscientes des dangers du radium, ont mis en place des normes strictes pour limiter son utilisation. Les cas de maladies graves parmi les travailleurs exposés au radium, ainsi que les incidents médicaux

impliquant des patients, ont poussé à une réévaluation des risques liés à l'usage de cet élément en milieu hospitalier. Les institutions médicales ont progressivement abandonné le radium au profit de méthodes plus sûres, notamment avec l'adoption de techniques de radiothérapie utilisant des faisceaux externes de rayonnement ionisant, qui ne nécessitent pas l'emploi de matériaux radioactifs à haute activité comme le radium.(71)

C. Effets sur la santé de l'exposition au radium

1. Effets à court terme

Les effets à court terme de l'exposition au radium sont généralement liés à une exposition aiguë à de fortes doses.

Cela peut se produire lors d'accidents impliquant des sources radioactives non protégées ou dans des environnements de travail où les protocoles de sécurité sont insuffisants.

Les symptômes immédiats peuvent inclure des brûlures radiologiques, des ulcérations cutanées et des symptômes systémiques tels que nausées, vomissements, et fatigue intense. Ces symptômes sont souvent le résultat d'une destruction rapide des cellules par les rayonnements, et peuvent être suivis par une leucopénie, augmentant le risque d'infections.(58,62,63)

2. Effets à long terme

Les effets à long terme de l'exposition au radium peuvent être beaucoup plus importants en termes de gravité et concernent des pathologies chroniques qui peuvent se manifester des années, voire des décennies, après l'exposition initiale.

Le radium, une fois ingéré ou inhalé, se fixe principalement dans les os, où il peut rester actif pendant des années, émettant des rayonnements qui endommagent progressivement les cellules osseuses ainsi que la moelle osseuse.

Les conséquences à long terme incluent l'ostéosarcome, la leucémie, et d'autres formes de cancer, notamment des poumons et des sinus. Ces effets sont irréversibles et peuvent être mortels, surtout en l'absence de diagnostic précoce et de traitement approprié.(59,62,63)

3. Cas historiques

L'un des cas historiques les plus tragiques d'exposition au radium est celui des « *Radium Girls* » dans les années 1920 qui a été décrit précédemment.

Un autre exemple est celui du scientifique Henri BECQUEREL, qui a souffert de brûlures importantes après avoir transporté du radium dans sa poche, soulignant les risques associés à une manipulation imprudente du radium.(58)

D. Mesures de prévention et réglementation en vigueur

1. Réglementation internationale et nationale

La réglementation internationale sur l'utilisation du radium et d'autres substances radioactives est principalement guidée par les recommandations de l'AIEA et de la CIPR.

Ces organismes établissent des normes pour la protection contre les rayonnements ionisants, y compris des limites d'exposition et des procédures de sécurité pour la manipulation et le stockage du radium.

Les réglementations nationales, telles que celles mises en place par la Commission de Réglementation Nucléaire (NRC) aux États-Unis et l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN) en France, adaptent les directives internationales à leurs contextes juridiques et industriels spécifiques, assurant ainsi une surveillance rigoureuse des installations où le radium est utilisé.(72–75)

Ces réglementations incluent des exigences strictes pour l'autorisation, la gestion des risques, la formation des travailleurs, et la surveillance environnementale, avec des inspections régulières pour garantir la conformité aux normes établies. En outre, elles imposent des mesures de sécurité spécifiques pour minimiser les risques d'exposition accidentelle et protéger la santé publique.

2. Mesures de prévention en milieu professionnel

a. EPC

Les équipements de protection collective (EPC) sont essentiels pour réduire les risques d'exposition au radium dans les environnements professionnels. Ces équipements incluent des systèmes de ventilation adaptés pour éviter l'accumulation de radon, des écrans de protection pour contenir les sources radioactives, et des barrières physiques pour limiter l'accès aux zones à haut risque. L'utilisation d'EPC est obligatoire dans les installations où le radium est manipulé, et leur efficacité doit être régulièrement évaluée pour s'assurer qu'ils offrent une protection adéquate.(72,75)

b. EPI

Les équipements de protection individuelle (EPI) complètent les EPC en offrant une protection supplémentaire aux travailleurs directement exposés au radium. Les EPI comprennent des gants, des vêtements de protection, et des masques respiratoires conçus pour empêcher l'inhalation de particules radioactives ou le contact direct avec le radium. Les travailleurs doivent être formés à l'utilisation correcte des EPI, et ces équipements doivent être régulièrement inspectés et remplacés pour garantir leur efficacité.(72)

c. Alternatives

L'une des mesures de prévention les plus efficaces consiste à remplacer le radium par des isotopes moins dangereux dans les applications où cela est possible. Par exemple, en radiothérapie, le ^{60}Co et le ^{137}Cs sont souvent utilisés à la place du radium en raison de leurs propriétés similaires mais avec un risque d'exposition plus faible.

L'adoption d'alternatives plus sûres contribue à réduire l'exposition au radium dans les environnements médicaux et industriels.(72)

d. Formation

La formation continue des travailleurs est essentielle pour minimiser les risques d'exposition au radium. Cette formation doit couvrir les principes de base de la radioprotection, les protocoles de sécurité spécifiques à la manipulation du radium, et l'utilisation correcte des EPC et EPI. Les programmes de formation doivent être mis à jour régulièrement pour refléter les dernières avancées en matière de sécurité et de réglementation.(72,75)

e. Surveillance médicale

La surveillance médicale régulière des travailleurs exposés au radium est une exigence réglementaire dans de nombreux pays. Cette surveillance permet de détecter précocement les signes de contamination ou d'exposition excessive et de mettre en place des mesures correctives. Les examens médicaux peuvent inclure des tests sanguins, des examens radiologiques, et des analyses d'urine ou encore de selles³⁴ pour détecter la présence de radium ou de ses produits de désintégration.(72,75)

En FRANCE, les travailleurs sont classés en catégorie A ou B et doivent bénéficier d'un SIR par la médecine du travail.

3. Protocoles de manipulation et de stockage

La manipulation du radium exige un environnement contrôlé pour prévenir tout risque d'exposition. Le radium doit être manipulé sous des hottes de laboratoire équipées de filtres HEPA (*High-Efficiency Particulate Air*) pour éviter la dispersion de particules radioactives.

Les installations de stockage doivent être sécurisées, avec des conteneurs plombés pour protéger contre les rayonnements. Ces conteneurs doivent être inspectés régulièrement pour s'assurer de leur bon état et qu'ils ne présentent pas de signes de dégradation qui pourraient conduire à des fuites radioactives.(72,74)

³⁴ Le suivi radiotoxicologique des selles est l'examen le plus pertinent pour le radium selon l'IRSN, interrogé dans le contexte de la contamination du bâtiment ex-oncologie.

4. Gestion des déchets radioactifs et problèmes liés à la décontamination

La gestion des déchets radioactifs contenant du radium est un défi majeur, nécessitant des protocoles stricts pour éviter toute contamination de l'environnement. Les déchets doivent être collectés dans des conteneurs spécialement conçus pour résister aux radiations et à la corrosion, puis stockés dans des installations autorisées et surveillées en permanence. La décontamination des sites où le radium a été utilisé pose également des problèmes complexes, en particulier dans les installations anciennes où les normes de gestion des déchets n'étaient pas aussi strictes qu'aujourd'hui. Les méthodes de décontamination peuvent inclure l'encapsulation des déchets, le décapage chimique, ou l'enlèvement du sol contaminé, mais ces processus sont souvent coûteux et nécessitent une expertise technique avancée.(72,75) En FRANCE, ces missions sont confiées à l'Andra.

IV. Le radon et son utilisation professionnelle

A. Histoire et propriétés du radon

1. Découverte du radon

Le radon est un élément chimique de symbole Rn et de numéro atomique 86.

En 1899, les physiciens britanniques Ernest RUTHERFORD et Robert B. OWENS³⁵ ont observé la présence d'une émanation radioactive lorsqu'ils ont travaillé avec du thorium (Th), ils ont simplement nommé ce phénomène « émanation de thorium ».(76)

Un an plus tard, le physicien allemand Friedrich Ernst DORN, en étudiant la radioactivité émanant du radium, a découvert une émanation similaire qu'il a appelée « émanation de radium ».(77) Cette découverte a marqué l'identification d'un nouveau gaz radioactif, plus tard reconnu comme un nouvel élément chimique.

Ce n'est que plus tard que la communauté scientifique a réalisé que ces différentes émanations (du radium et du thorium) étaient des isotopes d'un seul et même élément. Cette compréhension a conduit à la reconnaissance officielle du radon en tant qu'élément à part entière. En 1923, l'IUPAC a nommé cet élément radon", en hommage au radium, l'élément à la source de sa découverte.(78)

³⁵ Ingénieur américain en électrotechnique ayant participé à la découverte du radon et des particules α .

Le radon a suscité un intérêt particulier en raison de sa radioactivité naturelle et des risques pour la santé qu'il présente. Cette découverte s'est avérée essentielle, non seulement pour la compréhension de la radioactivité, mais aussi pour l'établissement de normes de sécurité dans les milieux résidentiels et professionnels.(79)

2. Propriétés physiques et chimiques

Le radon est un gaz noble, qui appartient au groupe 18 du tableau périodique.

Tous les gaz nobles partagent des propriétés communes, comme l'inertie chimique, ce qui signifie qu'ils ne réagissent pas facilement avec d'autres substances en raison de leur configuration électronique stable. Toutefois, le radon se distingue par ses caractéristiques spécifiques dues à sa forte masse atomique et à sa radioactivité.(80)

Le radon est un gaz incolore, inodore et insipide à température ambiante, ce qui le rend difficile à détecter sans l'aide d'équipements spécialisés.(81) Il s'agit d'un gaz 7,5 fois plus dense que l'air.

Sur le plan radioactif, le radon est produit par la désintégration du radium 226 (^{226}Ra), un isotope présent naturellement dans les roches, les sols, et même certains matériaux de construction. L'isotope le plus stable du radon, le radon 222 (^{222}Rn), a une demi-vie d'environ 3,8 jours, il se désintègre rapidement en émettant des particules α . Cette radioactivité fait du radon un élément particulièrement dangereux lorsqu'il est inhalé, car ces particules α peuvent causer des dommages aux tissus pulmonaires, augmentant ainsi le risque de cancer du poumon.(82)

B. Sources et voies d'exposition au radon, focus sur le milieu hospitalier

1. Sources naturelles et anthropiques du radon

Le radon provient principalement de sources naturelles. Il est naturellement produit par la désintégration radioactive de l'uranium et du radium présents dans la croûte terrestre.

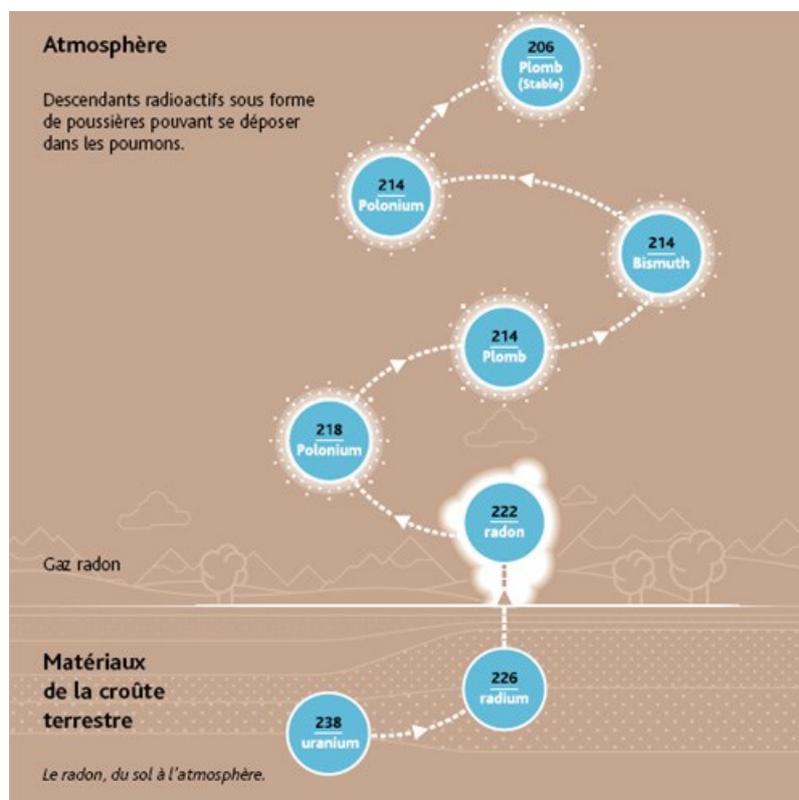


Figure 31 – Production naturelle du radon.(83)

Le radon, sous forme de gaz, est libéré du sol et des roches et peut s'accumuler dans l'air, surtout dans les zones mal ventilées comme les sous-sols et les caves.(84)

En dehors de ces sources naturelles, le radon peut également être libéré par des sources anthropiques, telles que les activités minières et les matériaux de construction contenant du radium, comme certains types de granite.

2. Voies d'exposition au radon

a. Inhalation

L'inhalation est la principale voie d'exposition au radon. Une fois inhalé, le radon émet des particules radioactives qui se logent dans les tissus pulmonaires. Ces sont des radiations α qui peuvent endommager les cellules pulmonaires, entraînant un risque accru de cancer du poumon.(85)

b. Ingestion et contact cutané

L'ingestion d'eau contaminée par le radon constitue également une voie d'exposition. L'eau souterraine, notamment celle provenant de puits, peut contenir des concentrations élevées de radon. Lorsqu'elle est ingérée, le radon peut exposer les organes internes à des radiations, bien que le risque soit moindre comparé à l'inhalation. Le contact cutané avec de l'eau contenant du radon est généralement considéré comme peu préoccupant car la peau agit comme une barrière efficace contre l'absorption du radon.(61)

c. Exemples de professions à risque

Certaines professions sont davantage exposées au radon que d'autres, notamment les mineurs, en particulier ceux travaillant dans les mines d'uranium, qui sont exposés à des concentrations élevées de radon dans l'air. Les travailleurs des secteurs de la construction et de la plomberie peuvent également être exposés lorsqu'ils travaillent avec des matériaux contenant du radium ou dans des environnements mal ventilés. En milieu hospitalier, les techniciens de radiologie ou ceux travaillant dans des zones souterraines ou des services de radiothérapie peuvent être exposés à des concentrations plus élevées de radon, bien que ces risques soient généralement bien contrôlés par des mesures de sécurité strictes.(86)

3. Utilisation du radon médical : la radiothérapie

Historiquement, le radon a été utilisé en radiothérapie pour traiter certaines formes de cancer, en particulier les cancers de la peau. Le radon, encapsulé dans des aiguilles ou des tubes, était inséré directement dans les tumeurs pour délivrer une dose de radiation ciblée.

Cette méthode, connue sous le nom de curiethérapie, était largement utilisée avant d'être progressivement abandonnée au profit d'isotopes plus sûrs et plus contrôlables, comme l'iridium 192 (^{192}Ir) ou le ^{137}Cs . L'utilisation du radon en médecine a diminué en raison des risques associés à sa manipulation et à son potentiel de contamination accidentelle, mais il a joué un rôle important dans le développement des premières techniques de radiothérapie.(87)

4. Autres utilisations professionnelles du radon

En dehors de la médecine, le radon a été utilisé dans diverses applications scientifiques, notamment dans l'étude des processus de diffusion des gaz et pour la calibration des instruments de mesure de la radioactivité. Cependant, en raison de sa toxicité et des risques associés à son utilisation, le radon a été largement remplacé par d'autres isotopes plus sûrs dans de nombreuses applications.(88)

C. Effets sur la santé de l'exposition au radon

1. Effets à court terme

Les effets à court terme de l'exposition au radon sont généralement peu perceptibles. Contrairement à des substances comme le monoxyde de carbone, le radon n'entraîne pas de symptômes immédiats tels que maux de tête, vertiges ou nausées. Cependant, une exposition aiguë à des concentrations extrêmement élevées de radon, bien que rare, pourrait entraîner des dommages temporaires aux tissus pulmonaires, mais cela reste un scénario théorique plutôt qu'une observation clinique courante.(89)

2. Effets à long terme

L'exposition prolongée au radon est une préoccupation de santé publique, en particulier en ce qui concerne le cancer du poumon.

Le radon est la deuxième cause de cancer du poumon après le tabagisme, et représente environ 21 000 décès par an rien qu'aux ETATS-UNIS.(80)

Lorsque le radon est inhalé, il se désintègre dans les poumons en émettant des particules α . Ces particules, bien que n'ayant qu'une portée très limitée, sont suffisamment énergétiques pour causer des dommages importants à l'ADN des cellules pulmonaires. Ce processus peut entraîner des mutations qui, au fil du temps, peuvent évoluer en cancer. Ce risque est particulièrement élevé pour les fumeurs, chez qui l'effet combiné du tabac et du radon multiplie par dix les chances de développer un cancer du poumon.(90)

3. Cas historiques

L'impact du radon sur la santé a été observé pour la première fois chez les mineurs d'uranium, en particulier ceux travaillant dans les mines de SCHNEEBERG en ALLEMAGNE et les mines du COLORADO aux ETATS-UNIS dans la première moitié du XXe siècle.(91)

D. Mesures de prévention et réglementation en vigueur

1. Réglementation internationale et nationale

Face aux dangers posés par le radon, diverses organisations internationales et nationales ont mis en place des réglementations pour limiter l'exposition à ce gaz. L'OMS recommande des seuils maximaux de concentration de radon à ne pas dépasser dans les habitations et les lieux de travail.(80)

L'AIEA et la CIPR fournissent également des directives sur les doses maximales de radiation acceptables provenant du radon.(92)

En EUROPE, la Directive 2013/59/EURATOM impose aux États membres de fixer des seuils de concentration pour le radon dans les bâtiments publics et privés, et d'établir des programmes de surveillance pour détecter et réduire les niveaux de radon.

2. Mesures de prévention en milieu professionnel

a. EPC

Les EPC sont essentiels pour réduire l'exposition au radon dans les environnements professionnels. Ces mesures incluent l'amélioration de la ventilation des bâtiments pour permettre la dissipation du radon, l'étanchéité des fissures dans les fondations pour empêcher son infiltration, et l'installation de systèmes de dépressurisation du sous-sol pour empêcher le radon de pénétrer dans les espaces de travail. Ces mesures sont particulièrement cruciales dans les mines, les hôpitaux, et d'autres environnements où des concentrations élevées de radon peuvent s'accumuler.(86)

b. EPI

En complément des EPC, les EPI peuvent être utilisés pour protéger les travailleurs contre l'exposition au radon. Ces équipements incluent des masques respiratoires capables de filtrer les particules radioactives émises par le radon (masques équipés de filtres FFP3). Cependant, l'utilisation d'EPI est généralement considérée comme une mesure secondaire, utilisée dans les situations où les EPC ne sont pas suffisants ou en complément lors de l'intervention dans des environnements à haut risque.(93)

c. Alternatives

Dans certaines situations, il est possible de réduire les risques en remplaçant les matériaux ou processus à risque par des alternatives plus sûres. Par exemple, on peut éviter d'utiliser des matériaux de construction susceptibles de contenir du radium ou adopter des méthodes de travail qui minimisent l'exposition au radon, comme le recours à des techniques d'extraction minière qui limitent l'accumulation de radon dans l'air.

d. Formation

La formation est un élément clé de la prévention de l'exposition au radon en milieu professionnel. Les travailleurs doivent être informés des risques associés au radon, des mesures de prévention à adopter, et de l'utilisation correcte des EPC et EPI. Des programmes de formation réguliers sont nécessaires pour maintenir un niveau élevé de vigilance et de compétence parmi le personnel exposé.

En FRANCE, les travailleurs accédant à des zones à risque de radon reçoivent des informations sur les dangers associés à ce gaz. Ceux pour lesquels l'exposition au radon peut dépasser 6 mSv.an^{-1} par an bénéficient d'une formation spécifique, dont le contenu est détaillé dans l'article R. 4451-58 du Code du travail.

e. Surveillance médicale

Les travailleurs régulièrement exposés au radon doivent bénéficier d'une surveillance médicale adaptée pour détecter précocement les effets potentiels de l'exposition. Cette surveillance comprend des examens médicaux réguliers, des spirométries.

La réalisation d'une biologie sanguine est, a priori, sans intérêt. (94)

V. Méthodologie de la synthèse de la littérature

Une synthèse de la littérature (ou revue narrative) permet de recenser des écrits sur un sujet donné dans le but de présenter un état des connaissances à travers une vue d'ensemble de la littérature scientifique sur un sujet précis, afin d'en faire une synthèse.

Cette approche méthodologique ne répond pas à un protocole clairement défini contrairement à la revue systématique de la littérature.

A. Processus de recherche bibliographique

Pour réaliser une bibliographie dans le cadre de ce travail de synthèse de la littérature, des recherches ont été effectuées dans les bases de données internationales, dans les bases de données de la littérature scientifique francophone ainsi que dans des bases de données permettant d'accéder à la littérature grise³⁶.

1. Recherche dans les bases de données internationales

Les bases de données internationales interrogées pour ce travail de synthèse sont les moteurs de recherche de *MEDLINE* et de *Cochrane database of systematic reviews*, à savoir, respectivement, *PubMed* et *Cochrane library*.

³⁶ La littérature grise est ce qui est produit par toutes les instances du gouvernement, de l'enseignement et la recherche publique, du commerce et de l'industrie, sous un format papier ou numérique, et qui n'est pas contrôlé par l'édition commerciale. Définition de la 3^e conférence internationale sur la littérature grise, 1997.

2. Recherche dans les bases de données francophones

La littérature scientifique francophone a été répertoriée en passant par les moteurs de recherche de CISMef (Catalogue et Index des Sites Médicaux de la langue Française), de LiSSa (Littérature Scientifique en Santé) et de Cairn.

3. Recherche de la littérature grise

La recherche bibliographique de la littérature grise a été effectuée sur le moteur de recherche de *Google Scholar*.

4. Définition des mots-clés et *MeSH (Medical Subject Heading)*

Les mots-clés et les *MeSH* ont été définis à partir du sujet de ce travail de recherche et de ses objectifs (principal et secondaires). Ceux qui ont été retenus sont les suivants : *Radium* ; *Radon* ; *Historical contamination* ; *Health effects* ; *Hospital building* ; *Healthcare facility* ; *Occupational exposure* ; *Radiation exposure* ; *Low-dose radiation* ; *Post-exposure monitoring* ; *Preventive measures* ; *Environmental Exposure* ; *Radiation Injuries* ; *Radiation Monitoring* ; *Radiation Protection* ; *Radiation, Ionizing* ; *Neoplasms, Radiation-Induced* ; *Risk Assessment* ; *Post-exposure monitoring* ; *Guidelines* ; *Recommendations* ; *Preventive measures*.

Ceux-ci ont ensuite été associés à l'aide d'opérateurs booléens³⁷ (AND, OR³⁸) pour obtenir des algorithmes permettant d'interroger les bases de données, en fonction des objectifs établis dans le travail de recherche.

³⁷ Opérateurs définis par George Boole, en 1854, permettant de modéliser des raisonnements logiques d'un point de vue algébrique.

³⁸ En français : ET, OU

Cette stratégie de recherche, en utilisant des mots-clés, des *MeSH* et des opérateurs booléens, permettait de couvrir de manière exhaustive la littérature existante sur la contamination au radium et au radon, leurs effets sur la santé et les mesures de prévention nécessaires.

Les différents moteurs de recherche ont été interrogés sur des publications strictement postérieures à 1999 afin de ne recenser que les données les plus récentes.

Les différents algorithmes utilisés sont présentés dans les tableaux 7, 8, 9 et 10 des parties suivantes.

a. Algorithmes utilisés pour correspondre à l'objectif principal

L'objectif principal de ce travail est d' « Identifier les principaux effets sur la santé d'une contamination au radium et la nécessité de mettre en place un suivi post-exposition ».

Moteur de recherche	Algorithme	Nombre de résultats
<i>PubMed</i>	(Radium[MeSH Terms] AND ("Health effects" OR Radiation Injuries[MeSH Terms] OR Neoplasms, Radiation-Induced[MeSH Terms]))	80
<i>Cochrane library</i>	(Radium) AND (Health effects OR Radiation Injuries OR Neoplasms, Radiation-Induced)	45
CISMeF	((radium.ti) OU (radium.mc)) ET ((évaluation des impacts sur la santé.ti) OU (évaluation des impacts sur la santé.mc) OU (Lésions radiques.ti) OU (Lésions radiques.mc) OU (tumeurs radio-induites.ti) OU (tumeurs radio-induites.mc))	2
LISSA		6
Cairn	("radium" ET (cancer OU tumeur OU lésion radique))	64
<i>Google Scholar</i>	(Radium) AND (Health effects OR Radiation Injuries OR Neoplasms, Radiation-Induced)	3410

Tableau 7 – Algorithmes³⁹ utilisés pour la recherche bibliographique (objectif principal).

³⁹ Chaque moteur de recherche utilisant son propre système de mots-clés / MeSH, cela explique pourquoi tous les algorithmes ne sont pas identiques.

Il est à noter que les recherches ne portent que sur les effets sur la santé d'une contamination au radium dont découleront les éléments de suivi post-exposition à mettre en place ou non.

b. Algorithmes utilisés pour correspondre aux objectifs secondaires

i. Premier objectif secondaire

L'objectif secondaire n°1 de ce travail est de « Rechercher s'il existe des données dans la littérature concernant des situations similaires de populations exposées dans des bâtiments contaminés au radium et l'éventuel impact sur la santé de ces sujets exposés accidentellement ».

Moteur de recherche	Algorithme	Nombre de résultats
<i>PubMed</i>	(Radium[MeSH Terms]) AND (Historical contamination OR Environmental Exposure[MeSH Terms]) AND (Building OR Hospital[MeSH Terms]) AND ("Health effects" OR Radiation Injuries[MeSH Terms])	1
<i>Cochrane library</i>	(Radium) AND (Historical contamination OR Environmental Exposure) AND (Building OR Hospital) AND (Health effects OR Radiation Injuries)	0
CISMeF	((radium.ti) OU (radium.mc)) ET ((exposition professionnelle.ti) OU (exposition professionnelle.mc) OU (exposition environnementale.ti) OU (exposition environnementale.mc) OU (contamination.ti) OU (contamination.mc)) ET ((hôpitaux.ti) OU (hôpitaux.mc) OU (lieu de travail.ti) OU (lieu de travail.mc)) ET ((évaluation des impacts sur la santé.ti) OU (évaluation des impacts sur la santé.mc) OU (Lésions radiques.ti) OU (Lésions radiques.mc) OU (tumeurs radio-induites.ti) OU (tumeurs radio-induites.mc))	0
LiSSA		0
Cairn	("radium") ET (hôpital OU lieu de travail OU bâtiment OU contamination) ET (cancer OU tumeur OU lésion radique)	45
<i>Google Scholar</i>	("Radium") AND (Historical contamination OR Environmental Exposure) AND (Hospital building OR Healthcare facility) AND (Health effects OR Radiation Injuries)	5440

Tableau 8 - Algorithmes utilisés pour la recherche bibliographique (objectif secondaire 1).

ii. Deuxième objectif secondaire

L'objectif secondaire n°2 de ce travail est de « Rechercher s'il existe des données concernant les effets sur la santé d'une exposition au radium, au radon ou à la radioactivité, même à faible dose, en milieu professionnel ».

Moteur de recherche	Algorithme	Nombre de résultats
<i>PubMed</i>	(Radium[MeSH Terms] OR Radon[MeSH Terms] OR Radiation, Ionizing[MeSH Terms]) AND (Occupational Exposure[MeSH Terms] OR Professional Exposure) AND ("Health effects" OR Radiation Injuries[MeSH Terms])	547
<i>Cochrane library</i>	(Radium OR Radon OR Radiation, Ionizing) AND (Occupational Exposure OR Professional Exposure) AND ("Health effects" OR Radiation Injuries)	6
CISMeF	((radium.ti) OU (radium.mc) OU (radon.ti) OU (radon.mc) OU (rayonnement ionisant.ti) OU (rayonnement ionisant.mc)) ET ((exposition professionnelle.ti) OU (exposition professionnelle.mc)) ET ((évaluation des impacts sur la santé.ti) OU (évaluation des impacts sur la santé.mc) OU (Lésions radiques.ti) OU (Lésions radiques.mc) OU (tumeurs radio-induites.ti) OU (tumeurs radio-induites.mc))	13
LiSSA		7
Cairn	(radium OU radon OU rayonnement ionisant) ET (exposition professionnelle) ET (tumeur OU cancer OU lésion radique)	8
<i>Google Scholar</i>	(Radium OR Radon OR Radiation, Ionizing) AND (Occupational Exposure OR Professional Exposure) AND ("Health effects" OR Radiation Injuries)	18600

Tableau 9 - Algorithmes utilisés pour la recherche bibliographique (objectif secondaire 2).

iii. Troisième objectif secondaire

L'objectif secondaire n°3 de ce travail est de « Rechercher s'il existe des recommandations scientifiques sur le suivi post-exposition pour les sujets exposés au risque radium / radon ».

Moteur de recherche	Algorithme	Nombre de résultats
<i>PubMed</i>	(Radium[MeSH Terms] OR Radon[MeSH Terms]) AND (Post-exposure monitoring OR Radiation Monitoring[MeSH Terms] OR Radiation Protection[MeSH Terms]) AND (Guidelines OR Recommendations OR Preventive measures)	513
<i>Cochrane library</i>	(Radium OR Radon) AND (Post-exposure monitoring OR Radiation Monitoring OR Radiation Protection) AND (Guidelines OR Recommendations OR Preventive measures)	6
CISMeF	((radium.ti) OU (radium.mc) OU (radon.ti) OU (radon.mc)) ET ((médecine du travail.ti) OU (médecine du travail.mc) OU (santé au travail.ti) OU (santé au travail.mc) OU (médecine du travail.ti) OU (médecine du travail.mc) OU (radioprotection.ti) OU (radioprotection.mc))	6
LISSA		10
Cairn	(radium OU radon) ET (médecine du travail OU santé au travail OU médecin du travail OU radioprotection)	42
<i>Google Scholar</i>	(Radium OR Radon) AND (Post-exposure monitoring OR Radiation Monitoring OR Radiation Protection) AND (Guidelines OR Recommendations OR Preventive measures)	782

Tableau 10 - Algorithmes utilisés pour la recherche bibliographique (objectif secondaire 3).

B. Description des critères de sélection des études, critères d'inclusion et d'exclusion

Les résultats obtenus à partir de ces algorithmes ont permis d'obtenir une liste de publications qui ont été analysées par un seul lecteur, Guillaume SCHMITT.

Les publications retenues devaient être rédigées en langue anglaise ou en français, uniquement. L'article complet devait être accessible depuis les bases de données à partir d'un compte étudiant de l'Université de STRASBOURG.

Les doublons ont été écartés avant la sélection des publications.

La sélection des publications s'est faite en deux étapes : d'abord une analyse du titre et du résumé de chacune d'entre elles, puis une lecture du texte intégral pour celles répondant aux critères d'inclusion et d'exclusion.

Les critères d'inclusion retenus pour ces publications étaient :

- Publications traitant des effets sur la santé du radium ou du radon, y compris à faible dose ;
- Publications abordant le suivi post-exposition ou post-professionnel concernant les risques radium, radon ou rayonnements ionisants ;
- Sujet portant sur des cas de contaminations ou d'expositions en milieu professionnel.

Les critères d'exclusion appliqués lors de la phase d'analyse des titres et des résumés étaient :

- Non-conformité aux critères d'inclusion ;
- Absence de résumé.

Les critères d'exclusion appliqués lors de la phase de lecture intégrale des publications étaient :

- Etudes ne portant pas sur des sujets humains ;
- Articles d'opinion ;
- Articles éditoriaux ;
- Lettres à l'éditeur ;
- Articles de journaux sans fondement scientifique.

Le processus d'inclusion est résumé dans le diagramme des flux. [Figure 30]

C. Exclusion de la littérature grise

Compte-tenu des délais de rédaction et de rendu du présent travail ainsi que du nombre de lecteurs, il a été décidé que la littérature grise comportant plus de vingt-huit mille résultats cumulés par la recherche des quatre algorithmes utilisés soit laissée de côté. Seules les publications issues de bases de données scientifiques ont été lues, incluses et analysées.

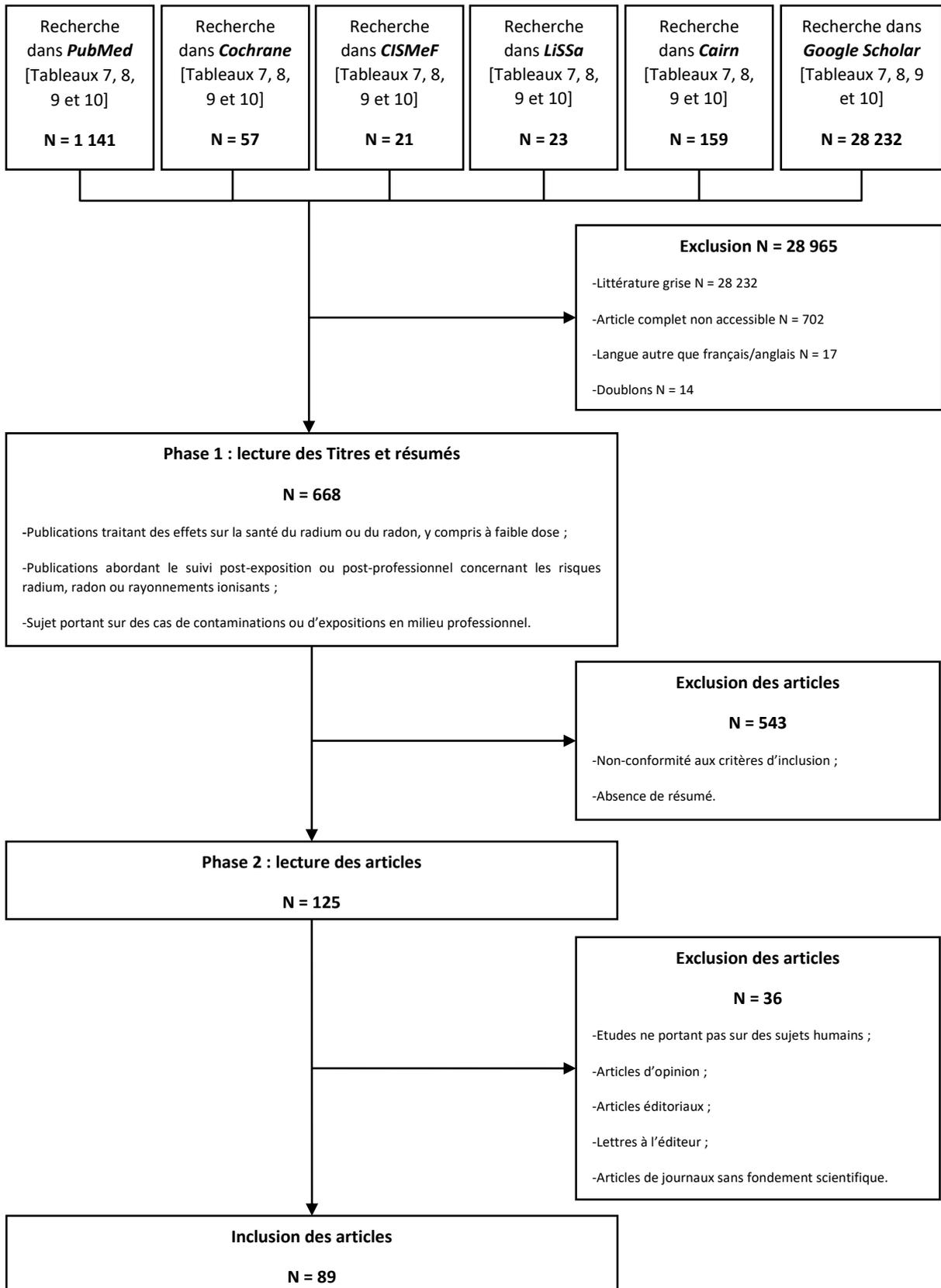


Figure 32 - Diagramme des flux d'inclusion des articles.

D. Méthodes d'analyse et de synthèse des données

La qualité des publications a été évaluée à partir des critères PRISMA de 2020. [Annexe 5].

Certains critères de cette checklist ont été utilisés pour extraire les données des publications incluses après la phase de lecture intégrale et les recenser dans un tableur visant à effectuer un premier travail de synthèse.

Les données extraites sont les suivantes :

- Titre ;
- Auteur(s) ;
- Type de publication ;
- Population concernée ;
- Risque étudié (radium, radon, rayonnements ionisants, faibles doses) ;
- Année de publication ;
- Objectif principal de la publication ;
- Résultats principaux et conclusions ;
- Biais ;
- Visibilité de la publication (*impact factor*⁴⁰).

Une fois ce travail réalisé, Guillaume SCHMITT a réalisé une synthèse finale des différentes publications retenues. [Annexe 6].

⁴⁰ Indicateur de visibilité d'une revue scientifique se basant notamment sur le nombre de citations des articles d'une même revue, sur une année donnée. Un impact factor > 1 offre une visibilité forte.

VI. Synthèse des résultats

A. Effets sur la santé du radium et nécessité d'un suivi post-exposition

L'exposition au radium, même à des doses considérées comme faibles, peut avoir des effets significatifs et variés sur la santé humaine, selon les études disponibles. Le radium, en tant qu'élément radioactif, émet des particules α qui, lorsqu'elles sont inhalées ou ingérées, se concentrent principalement dans les os en raison de leur affinité avec le calcium. Cette accumulation entraîne une irradiation continue des tissus osseux, ce qui peut provoquer diverses affections graves telles que les cancers osseux.

Le cancer du poumon est l'une des maladies les plus fréquemment associées à l'exposition au radium, particulièrement lorsqu'il s'agit d'inhalation de particules contenant du radium ou de ses descendants. Dans l'étude de KELLY-REIF et al. (2022), une association linéaire claire a été établie entre l'exposition cumulative au radon (un produit de désintégration du radium) et la mortalité par cancer du poumon chez les mineurs d'uranium. Cette relation était modifiée par des facteurs tels que l'âge au moment de l'exposition et le temps écoulé depuis cette exposition, ce qui souligne l'importance de ces variables dans l'évaluation du risque. En effet, cette étude mondialement un excès de risque relatif (ERR) pour le cancer du poumon de 0,54 par 100 mois d'exposition (WLM⁴¹) (95 % IC : 0,33-0,83), et un ERR plus élevé chez les fumeurs (ERR/100 WLM = 1,35) par rapport aux non-fumeurs (ERR/100 WLM = 0,12).(95)

⁴¹ 1 WLM correspond à une exposition à une quantité de radon, ou de ses descendants radioactifs, pouvant libérer $1,3 \cdot 10^5$ MeV dans 1 l d'air, pendant 1 mois standard de travail (170 heures).

Concernant les leucémies, l'étude de ZABLOTSKA et al. (2014), portant sur les travailleurs de l'uranium, a rapporté un risque accru de leucémies et autres cancers hématologiques. L'incidence moyenne d'exposition cumulative au radon était de 100,2 WLM, mais bien que l'étude ait relevé des tendances à l'augmentation des leucémies, les résultats n'étaient pas toujours statistiquement significatifs en raison d'une faible puissance statistique. Ces résultats soulignent l'importance d'un suivi rigoureux des personnes exposées au radium afin de détecter et traiter précocement les hémopathies malignes.(96)

L'exposition au radium a également été liée à des cancers rares mais graves, tels que le mésothéliome malin. Dans l'étude de NAKAMURA et al. (2009), il a été démontré que des points chauds de radiation se forment dans les poumons à la suite de l'accumulation de radium dans des corps protéiques ferrugineux. Ces concentrations de radium 226 dans les corps protéiques étaient jusqu'à 1 million de fois supérieures à celles trouvées dans l'eau de mer. Ces points chauds émettent des particules alpha à haute énergie qui provoquent des dommages répétés à l'ADN des cellules pulmonaires, ce qui peut initier la formation de tumeurs, y compris le mésothéliome malin. L'étude suggère que l'exposition prolongée à cette radiation interne est un facteur clé dans le développement de ce cancer rare et agressif.(97)

En outre, des études comme celle de KREUZER et al. (2014) ont exploré la relation entre l'exposition au radon (produit de décomposition du radium) et les cancers des voies aériennes extrathoraciques. Dans leur étude, réalisée sur une cohorte de 58 690 travailleurs de l'uranium en ALLEMAGNE, une légère augmentation du risque de mortalité liée aux cancers des voies aériennes extrathoraciques (incluant le pharynx, le larynx et les cavités nasales) a été observée, bien que cette augmentation ne soit pas statistiquement significative. L'ERR était de 0,036 par 100 WLM ($p = 0,12$), basé sur 234 décès, avec des ERR spécifiques de 0,017 pour

le larynx, 0,077 pour le pharynx, et 0,030 pour la bouche et la langue. Ces résultats indiquent un lien potentiel avec l'exposition au radon, bien que des recherches supplémentaires soient nécessaires pour confirmer cette association.(98)

L'étude de PRIEST et al. (2020) se concentre sur l'administration de faibles doses⁴² de ²²⁴Ra chez des patients atteints de spondylarthrite ankylosante, une maladie inflammatoire chronique affectant le rachis et le bassin. Contrairement aux traitements à haute dose de radium utilisés auparavant, les faibles doses (5,6 à 11,1 MBq) administrées dans cette étude n'ont pas entraîné d'augmentation significative du risque de développer des ostéosarcomes ou d'autres cancers osseux. Les résultats montrent que le risque de décès par leucémie était plus élevé chez les patients traités avec du radium (*hazard ratio* (HR) = 3,19, p = 0,015), mais aucune augmentation significative du risque de décès par cancer solide n'a été observée (HR = 1,13, p = 0,23). Par ailleurs, les patients traités présentaient un risque réduit de décès par maladies non cancéreuses (HR = 0,81, p < 0,001) et un risque global de mortalité plus faible (HR = 0,88, p = 0,012) par rapport au groupe témoin non exposé.

Cependant, l'étude indique que des doses plus élevées dans d'autres contextes ont effectivement conduit à des cancers osseux, notamment des ostéosarcomes. Ces cancers se développent généralement plusieurs années après l'exposition initiale au radium, ce qui souligne la nature insidieuse et retardée des effets secondaires associés à cette exposition.
(99)

⁴² Ici, faibles doses thérapeutiques.

D'autres études, telles que celle de MARTLAND (1925), sont représentatives de la gravité des effets du radium. Cette étude historique sur les « *Radium Girls* » a démontré que l'ingestion de radium, même en petites quantités⁴³, pouvait causer des nécroses osseuses, des fractures pathologiques, et des cancers de la mâchoire.(63)

Des effets non cancéreux ont également été observés chez les individus exposés au radium, notamment des maladies cardiovasculaires. L'étude de MILDNER et al. (2024) sur les travailleurs de l'usine de traitement de l'uranium de MALLINCKRODT a révélé une association significative entre l'exposition aux radiations et les maladies cardiovasculaires. Le risque de maladie cardiovasculaire augmentait avec la dose cumulative de radiations absorbée par le cœur, avec un HR de 1,11 pour 100 mGy (IC à 95 % : 1,02-1,21). Le risque de maladies coronariennes était également accru, avec un HR de 1,10 pour 100 mGy (95 % IC : 1,00-1,21), soulignant un lien dose-réponse cohérent. Ces résultats mettent en évidence que l'exposition prolongée aux faibles doses de radiation dans un contexte professionnel peut avoir des effets délétères non seulement sur le risque de cancer, mais aussi sur des systèmes vitaux comme le système cardiovasculaire.(100)

Les effets du radium ne se limitent pas aux cancers et aux maladies cardiovasculaires. Une étude de LOGANOVSKY et al. (2015) sur 196 travailleurs de TCHERNOBYL a révélé une augmentation significative des anomalies cérébrales détectées par électroencéphalographie quantitative (qEEG⁴⁴) et des troubles cognitifs légers après une exposition prolongée aux radiations ionisantes. En particulier, la proportion de travailleurs présentant des déficits cognitifs légers est passée de 3,6 % à 11,2 % après l'exposition ($p < 0,01$), et 5,1 % ont

⁴³ Déposées au bout d'un pinceau.

⁴⁴ Electroencéphalogramme quantitatif utilisé pour analyser les ondes cérébrales et déterminer dans quelle mesure elles diffèrent de la normale.

développé des altérations pathologiques de l'EEG, indiquant des dommages potentiels au système nerveux central. Ces anomalies ont été interprétées comme des symptômes possibles d'un syndrome de fatigue chronique, lié à l'exposition au radium et d'autres éléments radioactifs. Bien que ces effets soient moins documentés que les risques de cancer, ils soulignent la nécessité d'approfondir la recherche sur les effets neurotoxiques d'une exposition prolongée aux radiations.(101)

Les preuves accumulées sur les effets du radium montrent clairement qu'un suivi médical post-professionnel peut s'avérer indispensable pour les individus ayant été exposés à ce radionucléide, à des doses relativement élevées. Un suivi à long terme permettrait de surveiller l'apparition tardive de cancers ou d'autres pathologies, facilitant ainsi une intervention précoce et potentiellement salvatrice.

Étant donné que de nombreux cancers liés à l'exposition au radium, tels que le cancer du poumon et les leucémies, peuvent mettre des années, voire des décennies, à se développer, un suivi post-professionnel peut être utile. Des examens réguliers et un dépistage ciblé des populations à risque pourraient permettre une détection précoce de ces cancers, améliorant ainsi les chances de traitement réussi.

Le radium représente un danger sanitaire significatif en raison de son potentiel à provoquer divers types de cancers et d'autres maladies graves. La mise en place d'un suivi médical pour les personnes exposées pourrait donc permettre de minimiser les impacts de cette exposition, permettant une détection et une prise en charge précoces des maladies.

B. Impact sur les populations exposées dans des bâtiments contaminés

Cette synthèse a pour objectif de rechercher dans la littérature scientifique des données concernant des situations similaires où des populations ont été exposées au radium dans des environnements bâtis, et d'examiner les impacts sanitaires associés à cette exposition accidentelle.

L'une des situations bien documentées concerne les bâtiments anciens où le radium a été utilisé dans des peintures luminescentes ou comme composant dans des dispositifs médicaux et industriels. Au fil du temps, ces matériaux ont pu se détériorer, libérant du radium dans l'environnement interne des bâtiments. Dans plusieurs études, notamment celles menées par BRUGGE et BUCHNER (2012), il a été démontré que ces sources de contamination peuvent entraîner une exposition prolongée et insidieuse au radium pour les occupants de ces bâtiments. Ces expositions, bien qu'involontaires, peuvent aboutir à des niveaux de radiation dangereux, équivalents à ceux rencontrés dans des contextes industriels.(102)

Les effets sanitaires pour les populations exposées accidentellement au radium dans des bâtiments contaminés sont similaires à ceux observés dans d'autres contextes d'exposition, mais ils présentent des caractéristiques particulières en raison de la nature prolongée et souvent inaperçue de l'exposition.

Le risque de cancer, en particulier de cancer du poumon, est une des principales préoccupations liées à l'exposition au radium dans des environnements contaminés. DESSAU et al. (2004) ont évalué le risque de cancer du poumon associé à l'exposition résidentielle au radon au QUEBEC, qui est un produit de désintégration du radium. Leur étude a révélé que les

niveaux de radon dans certaines habitations dépassaient les seuils recommandés, ce qui a été associé à une augmentation du risque de cancer du poumon. Les habitants de ces bâtiments sont exposés à des doses de radiation qui, bien que faibles ($< 800 \text{ Bq.m}^{-3}$), sont cumulatives et augmentent de manière significative le risque de développer des cancers à long terme.(103)

Outre le cancer du poumon, d'autres études citées précédemment, comme celles de ZABLOTSKA et al. (2014) ou encore de MILDER et al. (2024), mettent en évidence les liens entre l'exposition au radium dans des environnements contaminés et une augmentation des risques de leucémies et autres cancers hématologiques, ainsi que des effets non cancéreux tels que les maladies cardiovasculaires ou les troubles cognitifs. Bien que ces études se concentrent souvent sur des contextes professionnels ou sur des populations exposées à des niveaux élevés de radiation, les résultats sont pertinents pour les expositions accidentelles dans des bâtiments, où les doses cumulées, bien que potentiellement plus faibles, peuvent toujours présenter un risque significatif.(87,91)

L'exposition au radium dans des bâtiments contaminés représente un risque sanitaire significatif qui peut entraîner des conséquences graves, y compris des cancers et d'autres pathologies chroniques. La littérature existante souligne la nécessité de mise en place de stratégies de gestion rigoureuses, incluant le dépistage, le suivi médical à long terme et des interventions environnementales pour minimiser ces risques.

La recherche continue dans ce domaine est essentielle pour affiner les stratégies de prévention et de traitement, et pour protéger les populations contre les effets potentiellement dévastateurs de l'exposition accidentelle au radium.

C. Effets sur la santé des faibles doses

L'exposition à la radioactivité, même à faible dose⁴⁵, en milieu professionnel, peut être responsable d'effets potentiellement graves sur la santé des travailleurs. Le radium et le radon, deux sources importantes de radiation, ainsi que d'autres formes de radioactivité, peuvent être présents dans divers environnements professionnels, notamment dans l'industrie minière, la production d'énergie nucléaire, et certaines pratiques médicales. Cette synthèse explore les données disponibles dans la littérature scientifique sur les effets sanitaires de ces expositions professionnelles à faible dose, en se concentrant sur les risques de cancer, les maladies cardiovasculaires, et d'autres impacts sanitaires documentés.

Les effets cancérigènes de l'exposition au radium et au radon sont bien documentés, même à des niveaux d'exposition relativement faibles. RICHARDSON ET WING (2006) ont étudié la mortalité par cancer du poumon parmi les travailleurs d'une usine de fabrication de matériaux nucléaires à OAK RIDGE (TENNESSEE, ETATS-UNIS). Cette étude a montré une relation positive entre les doses cumulées de rayonnements externes et le risque de cancer du poumon. Plus précisément, pour chaque augmentation de 10 mSv, le risque de mortalité par cancer du poumon augmentait de 0,54 %. Cette augmentation est encore plus marquée pour les expositions survenues entre 5 et 14 ans avant le décès, avec une hausse de 0,97 % par 10 mSv. Ce résultat montre que même des doses inférieures à 100 mSv sont associées à une augmentation progressive mais significative du risque de cancer du poumon.(104) KREUZER et al. (2015), dans leur étude sur les mineurs d'uranium allemands, ont révélé une relation linéaire claire entre l'exposition cumulative au radon et le risque de cancer du poumon. L'ERR pour chaque unité d'exposition au radon était de 0,013 (IC à 95 % : 0,007-

⁴⁵ Doses < 100 mSv.an⁻¹.

0,021), confirmant une augmentation du risque même à faibles doses cumulées de radon. Ces résultats indiquent qu'à long terme, même une faible exposition cumulée au radon, en dessous de 100 WLM, entraîne une augmentation notable du risque de cancer du poumon.(105) KELLY-REIF et al. (2019) ont mené une étude approfondie sur les mineurs d'uranium en REPUBLIQUE TCHEQUE et dans d'autres régions, montrant une relation linéaire entre l'exposition cumulée au radon et le risque de cancer du poumon. Cette étude montre que même des expositions prolongées à de faibles doses, inférieures à 100 mSv, peuvent entraîner une augmentation significative du risque de cancer du poumon. Les mineurs exposés présentaient un *standardized mortality ratio* (SMR) de 2,12 (IC à 95 % : 1,96-2,28) indiquant que leur risque de mortalité par cancer du poumon était plus de deux fois supérieur à celui de la population générale. De plus, l'incidence du cancer du poumon était également élevée, avec un *standardized incidence ratio* (SIR) de 2,31 (IC à 95 % : 2,15-2,48), confirmant l'impact des faibles doses cumulées sur le risque de développer ce cancer. Cependant, les auteurs reconnaissent que des facteurs de confusion, comme le tabagisme, n'ont pas été totalement pris en compte. Ils mentionnent que le statut tabagique n'a pas été analysé dans cette étude, bien que les taux de tabagisme semblent élevés dans la cohorte comme dans la population générale. Par ailleurs, les mineurs étaient exposés à d'autres dangers professionnels tels que la poussière, les métaux lourds, et la silice, mais ces expositions n'ont pas fait l'objet d'ajustements spécifiques dans les résultats finaux. Ces résultats confirment que même des doses faibles et cumulées sur une longue période augmentent de manière significative le risque de cancer du poumon, soulignant l'importance de la durée de l'exposition et de l'accumulation progressive des faibles doses dans ce contexte professionnel. L'effet prolongé de ces expositions rappelle l'importance cruciale des mesures de

radioprotection, même dans des environnements où les doses individuelles peuvent paraître faibles.(106)

En ce qui concerne les cancers hématologiques, les études ont montré des résultats variés. ZABLOTSKA et al. (2014) ont analysé les effets de l'exposition prolongée à de faibles doses de rayonnement chez les travailleurs des mines d'uranium, notamment sur les cancers hématologiques. L'étude montre que, bien que les résultats ne soient pas statistiquement significatifs pour toutes les formes de leucémie, il existe une augmentation non significative du risque de leucémie lymphoïde chronique (LLC) avec l'augmentation de la dose de rayons γ . Les travailleurs avaient une exposition moyenne cumulée de 100,2 WLM aux produits de dégradation du radon et une dose moyenne cumulée de rayonnement γ au corps entier de 52,2 millisieverts (mSv). Plus précisément, l'ERR pour la LLC était de 7,52 par Sv (IC à 95 % : 0,57-1 ; $p = 0,375$), suggérant une tendance à un risque accru avec des doses croissantes, même à de faibles niveaux. Les résultats montrent également une augmentation non significative du risque de lymphome de HODGKIN avec un ERR de 13,0 par Sv (IC à 95 % : < 0,139 ; $p = 0,504$). Bien que ces résultats ne soient pas significatifs, ils suggèrent une possible relation entre l'exposition aux radiations et le développement de certains cancers hématologiques. Bien que les résultats n'aient pas été statistiquement significatifs pour toutes les formes de leucémie, ils suggèrent néanmoins une association possible entre l'exposition prolongée à faible dose et le développement de certains types de cancers hématologiques.(96)

L'exposition aux rayonnements ionisants, même à faible dose, est également associée à des risques accrus de maladies cardiovasculaires. MILDNER et al. (2024) ont mené une étude approfondie sur les travailleurs de l'usine de traitement de l'uranium de MALLINCKRODT, couvrant la période de 1942 à 2019. Les résultats ont révélé une augmentation significative des maladies cardiovasculaires en lien avec les doses de rayonnement reçues. L'étude a montré que le HR pour les maladies cardiovasculaires était de 1,11 par 100 mGy (IC à 95 % : 1,02-1,21), indiquant une augmentation de 11 % du risque de maladies cardiovasculaires pour chaque augmentation de 100 mGy de dose au cœur. Pour les maladies cardiaques ischémiques, le HR était également significatif à 1,10 par 100 mGy (IC à 95 % : 1,00-1,21). Cette relation dose-réponse positive est principalement attribuée aux expositions externes. Ces chiffres ne permettent pas de conclure directement sur les effets spécifiques des doses inférieures à 100 mSv. Les résultats suggèrent une tendance globale à l'augmentation des risques cardiovasculaires avec l'exposition aux radiations, mais pour évaluer l'impact strict des doses inférieures à 100 mSv, il faudrait que l'étude examine spécifiquement cette plage de doses, ce qui ne semble pas être le cas dans cette étude.(100)

Des recherches récentes sur les effets neurocognitifs de l'exposition professionnelle à de faibles doses de rayonnement ionisant ont montré des résultats préoccupants. LOGANOVSKY et al. (2015) ont conduit une étude sur les travailleurs impliqués dans la transformation de l'abri de la centrale nucléaire de TCHERNOBYL, exposés à des doses cumulées allant jusqu'à 56,7 mSv (moyenne : 19,9 mSv). L'étude a révélé des anomalies cérébrales quantifiées par électroencéphalographie quantitative (qEEG) ainsi que des troubles cognitifs chez ces travailleurs. Les résultats montrent une augmentation de l'activité des ondes δ dans les régions frontales du cerveau et une redistribution de l'activité α vers les zones frontales, avec une diminution de la fréquence dominante dans les régions temporales. Ces modifications

électroencéphalographiques étaient plus prononcées chez les travailleurs ayant une exposition cumulée de ^{239}Pu (supérieure à 1,5 MBq dans les échantillons de selles), suggérant une corrélation directe entre la dose d'exposition et les anomalies cérébrales. En termes de performance cognitive, l'étude a mis en évidence une augmentation significative des déficits cognitifs légers après l'exposition, passant de 3,6 % avant l'exposition à 11,2 % après l'exposition ($p < 0,01$). Les tests neuropsychologiques ont révélé une diminution de la mémoire verbale et une interférence proactive et rétroactive dans l'apprentissage, indiquant que les travailleurs exposés développaient des barrières d'apprentissage aux informations déjà mémorisées. Ces résultats suggèrent que même des expositions à de faibles doses de radiations ionisantes, en dessous de 100 mSv, peuvent entraîner des dysfonctionnements cognitifs subtils mais persistants, et que ces effets neurocognitifs peuvent être précoces, avant même l'apparition de symptômes psychiatriques cliniques. Ces effets justifient une surveillance médicale continue pour les travailleurs exposés à de tels environnements, soulignant la nécessité d'évaluations neuropsychologiques régulières.(101)

Au total, l'exposition aux rayonnements ionisants, même à des doses inférieures à 100 mSv, présente des risques importants pour la santé humaine. Les études ont montré que ces faibles doses, souvent perçues comme relativement sûres, peuvent entraîner une augmentation significative des risques de cancers, en particulier des cancers du poumon, des cancers osseux et des cancers hématologiques. Les mécanismes sous-jacents sont principalement liés à l'absorption et à l'accumulation des particules radioactives dans les tissus, notamment dans les os et les poumons, où les rayonnements causent des dommages cellulaires continus, augmentant ainsi le risque de transformation maligne. Cependant, il existe un manque d'études spécifiquement axées sur les faibles doses, ce qui complique la compréhension précise de la relation dose-réponse à ces niveaux d'exposition. Les recherches se concentrent

majoritairement sur des expositions plus élevées dans des contextes professionnels, laissant un vide en ce qui concerne les expositions prolongées à faibles doses, telles que celles rencontrées dans les environnements domestiques ou accidentels. En plus des cancers, les faibles doses de rayonnements ionisants ont également été associées à des effets non cancéreux, tels que les maladies cardiovasculaires et les troubles cognitifs. L'exposition prolongée, même à de faibles doses, peut entraîner des maladies cardiaques, augmentant le risque de mortalité par maladies coronariennes. De plus, des études récentes ont révélé des anomalies dans l'activité cérébrale et des troubles cognitifs chez les travailleurs exposés à de faibles doses de radiation, montrant que ces effets peuvent persister à long terme et avoir un impact significatif sur la santé mentale. Toutefois, ce suivi est d'autant plus important que les lacunes dans la recherche sur les faibles doses laissent de nombreuses incertitudes quant aux seuils de sécurité et à la nature exacte des risques encourus.

D. Recommandations scientifiques sur le suivi post-exposition pour les sujets exposés au risque radium / radon

L'exposition au radium et au radon, deux sources de radiations, présente des risques pour la santé des travailleurs. En raison de la longue latence des effets de ces expositions, des recommandations scientifiques pour un suivi post-exposition sont essentielles pour la gestion de la santé des individus concernés.

L'analyse de la littérature effectuée dans le cadre de ce travail de thèse ne met pas en évidence de recommandations, nationales ou internationales, claires concernant le suivi post-exposition des sujets exposés au radium ou au radon.

Toutefois, certaines publications proposent une surveillance médicale post-exposition.

En 2015, un groupe de travail multidisciplinaire coordonné par la Direction Générale du Travail (DGT), avec la participation de plusieurs sociétés savantes, telles que la Société Française de Médecine du Travail (SFMT), la Société de Pneumologie de Langue Française (SPLF), et la Société Française de Radiologie (SFR) et l'aide méthodologique de l'Institut National du Cancer (INCa) et de la Haute Autorité de Santé (HAS), propose des recommandations de bonne pratique concernant la surveillance médico-professionnelle des travailleurs exposés ou ayant été exposés à des agents cancérigènes pulmonaires. Dans ce texte, le suivi post-exposition pour les travailleurs exposés au radon et aux rayonnements ionisants repose sur des examens périodiques visant à détecter précocement les pathologies associées à ces expositions.⁽¹⁰⁷⁾ Les radiographies pulmonaires doivent être effectuées tous les deux ans, car elles permettent de surveiller les effets d'une exposition prolongée aux agents cancérigènes pulmonaires, comme le radon, qui peut augmenter le risque de cancer broncho-pulmonaire. Les scanners thoraciques *low-dose* sont recommandés également à une périodicité de 1 à 2 ans, en particulier pour les populations à risque élevé⁴⁶. Enfin, les bilans biologiques, incluant des examens hématologiques, sont à réaliser tous les deux ans pour identifier précocement les effets systémiques de l'exposition aux rayonnements ionisants, notamment en cas de contamination interne. Cette périodicité est justifiée par le fait que ces bilans permettent de détecter des anomalies sanguines qui peuvent être précurseurs de maladies graves telles que les cancers. Ces recommandations se basent sur l'annexe II de l'arrêté du 28 février 1995 fixant le modèle type d'attestation d'exposition et les modalités

⁴⁶ C'est-à-dire des populations ayant été exposées au radon et/ou aux rayonnements ionisants pendant au moins 10 ans et présentant un tabagisme actif ou un arrêt du tabagisme depuis moins de 15 ans au moins équivalent à 30 paquets-année.

d'examen dans le cadre du suivi post-professionnel des salariés ayant été exposés à des agents ou procédés cancérogènes et abrogé par l'arrêté du 16 septembre 2022.

Depuis cette abrogation, il n'y a plus de recommandation officielle.

RONCKERS et al. (2002), dans leur étude sur les patients traités par irradiation nasopharyngée au radium, ont souligné la nécessité d'un suivi à long terme pour détecter précocement les cancers associés à l'exposition. (108) Cette surveillance peut inclure des examens médicaux réguliers, des explorations fonctionnelles respiratoires (EFR) et des examens radiologiques pour surveiller les signes précoces de cancer, en particulier du poumon et des leucémies.

De même, RICHARDSON et al. (2015), dans leur étude INWORKS, ont recommandé un suivi épidémiologique à long terme des travailleurs exposés aux rayonnements ionisants. L'objectif est de détecter non seulement les cancers mais aussi les maladies cardiovasculaires et autres effets tardifs. Ces recommandations s'appuient sur les preuves accumulées montrant que même des expositions à faible dose peuvent avoir des conséquences graves, justifiant ainsi un suivi prolongé sur plusieurs décennies.(109)

Le dépistage des cancers est une composante centrale du suivi post-exposition recommandé pour les personnes exposées au radium et au radon. DESSAU et al. (2004) ont mis en avant l'importance des programmes de dépistage pour les cancers du poumon chez les populations exposées au radon dans les habitations, à partir d'un seuil⁴⁷ de 150 Bq/m³. (103)

⁴⁷ Ce qui correspondrait à une dose efficace annuelle estimée entre 3 et 10 mSv selon la CIPR. Cette estimation est basée sur une exposition annuelle d'environ 7 000 heures (soit environ 80 % du temps passé à l'intérieur) avec un facteur d'équilibre de 0,4 pour le radon domestique.

Ces programmes pourraient proposer des radiographies thoraciques régulières, des tomodensitométries *low-dose* pour détecter les nodules pulmonaires précoces.

Pour les individus exposés au radium, des bilans sanguins réguliers pour surveiller les anomalies hématologiques, telles que les leucémies, sont également recommandés. ZABLITSKA et al. (2013) ont suggéré que des tests sanguins annuels pourraient être une mesure préventive efficace pour détecter les signes précoces de leucémie chez les travailleurs exposés aux produits de désintégration du radon, comme chez les travailleurs de TCHERNOBYL qui sont suivis par des registres nationaux et bénéficient d'examens réguliers. L'étude a révélé que 78 % des travailleurs de TCHERNOBYL avaient reçu des doses inférieures à 100 mGy, mais malgré ces faibles expositions, un risque accru de leucémie a été observé. L'excès de risque relatif (ERR/Gy) pour toutes les leucémies était de 1,26 par gray (Gy) (IC à 95 % : 0,03-3,58), suggérant une augmentation significative du risque même à des doses faibles. Environ 16 % des cas de leucémie dans cette population étaient attribuables à l'exposition aux radiations, y compris pour des doses inférieures à 100 mGy. Ces résultats soulignent l'importance de bilans sanguins réguliers pour la détection précoce des leucémies chez les travailleurs exposés à de faibles doses de radiation.(110)

En plus du dépistage des cancers, la surveillance des maladies cardiovasculaires est implicitement conseillée par les publications pour les sujets exposés au radium ou au radon. MILDNER et al. (2024) ont montré une association entre l'exposition aux radiations et l'augmentation des risques de maladies cardiovasculaires, en particulier chez les travailleurs de l'industrie nucléaire.(100) Les recommandations pourraient inclure des examens réguliers de la fonction cardiaque, tels que des électrocardiogrammes (ECG), des échocardiographies, et des tests de stress cardiaque pour détecter toute anomalie à un stade précoce. Les individus

exposés devraient également être surveillés pour les facteurs de risque cardiovasculaires classiques, tels que l'hypertension, l'hypercholestérolémie, et le diabète, car ces conditions peuvent exacerber les effets des radiations sur le système cardiovasculaire.

Les effets neurocognitifs potentiels de l'exposition prolongée aux radiations pourraient également justifier un suivi spécifique. LOGANOVSKY et al. (2015) ont recommandé une évaluation neurocognitive régulière pour les travailleurs exposés aux radiations, en particulier ceux ayant travaillé dans des environnements hautement contaminés comme TCHERNOBYL.(101) Ce suivi pourrait inclure des tests de mémoire, des évaluations de la fonction exécutive, et des examens neurologiques pour détecter tout signe de déclin cognitif lié à l'exposition aux radiations.

En résumé, bien que les recommandations formelles de suivi post-exposition soient limitées, plusieurs études mettent en avant l'importance d'un dépistage régulier des cancers, des maladies hématologiques, cardiovasculaires et neurocognitives. Ces surveillances permettent une détection précoce des effets tardifs de l'exposition aux radiations et offrent une meilleure gestion de la santé des personnes concernées.

Le 30 août 2024, l'IRSN a publié de nouveaux résultats de l'étude épidémiologique INWORKS. Le rapport souligne que même de faibles doses de rayonnements ionisants (moins de 100 mSv) sont associées à un risque accru de leucémie, de lymphome et de myélome multiple chez les travailleurs de l'industrie nucléaire. L'étude INWORKS, qui regroupe des données de plus de 300 000 travailleurs de plusieurs pays, fournit une analyse approfondie des risques sanitaires à long terme liés à une exposition aux faibles doses de rayonnements. Les résultats montrent une relation dose-réponse, en particulier pour la leucémie lymphoïde chronique, où une augmentation significative du risque est observée avec une exposition

cumulée à des doses de rayonnement, même inférieures à 100 mSv. Ces conclusions sont cohérentes avec les études précédentes sur les survivants des bombes atomiques et suggèrent que les risques liés à une faible exposition aux rayonnements ont été sous-estimés par le passé. De plus, l'étude souligne que, bien que les doses plus élevées de rayonnements soient plus clairement associées à des cancers, le risque de maladies hématologiques malignes, telles que la leucémie, continue d'augmenter même avec des expositions à faible dose, ce qui met en évidence la nécessité de renforcer les mesures de protection contre les rayonnements, notamment pour les travailleurs de l'industrie nucléaire. En résumé, les nouveaux résultats de l'étude INWORKS apportent des preuves que même de faibles niveaux d'exposition entraînent un risque accru de certains cancers, justifiant une réévaluation des lignes directrices en matière de sécurité dans les milieux professionnels et médicaux où les rayonnements ionisants sont utilisés.(111)

VII. Réflexion sur l'impact des résultats sur la pratique en médecine et santé au travail

A. Suivi post-exposition ou suivi post-professionnel

Au cours de sa carrière, un salarié peut être exposé à divers risques professionnels, que ce soit par le biais de substances dangereuses ou de tâches à risque.

Certaines expositions peuvent avoir des répercussions sur la santé, parfois plusieurs décennies après la fin de l'exposition. Il est donc essentiel de mettre en place un suivi médical adapté et à long terme pour ces expositions, afin de détecter le plus tôt possible l'apparition de maladies potentiellement graves.

En FRANCE, deux types de suivi sont mis en place après la fin des expositions professionnelles : le suivi post-exposition et le suivi post-professionnel (112,113) :

- Le suivi post-exposition s'applique aux salariés qui ne sont plus exposés aux risques professionnels mais qui sont toujours en activité. Ce suivi peut être assuré dans le cadre du suivi individuel réalisé par le Service de Prévention et de Santé au Travail (SPST) ;
- Le suivi post-professionnel concerne les personnes inactives, demandeurs d'emploi ou retraités ayant été exposés à certains risques professionnels. Ce suivi est pris en charge sous certaines conditions dans le cadre d'un dispositif spécial au sein des CPAM qui permet aux assurés de ne pas avoir à financer ce suivi. Le financement relève du Fonds National de Prévention alimenté par les cotisations des employeurs privés. Le suivi peut être réalisé par le médecin traitant ou n'importe quel médecin

choisi par l'assuré (pneumologue, Centres hospitaliers de Pathologie Professionnelle, ...).

Seuls les salariés en SIR ou qui ont été en SIR au cours de leur carrière peuvent bénéficier de ces modalités de suivi. Les rayonnements ionisants font donc partie des expositions pouvant conduire des salariés à bénéficier de ces suivis.

Si le salarié remplit les critères pour bénéficier de ce suivi, il pourra se voir proposer une visite médicale préalable à sa mise en place. Cette visite peut être effectuée jusqu'à un mois avant la fin de l'exposition ou le départ à la retraite, ou jusqu'à six mois après la cessation de l'exposition. Au cours de cette visite, le médecin du travail réalise un examen clinique du salarié ainsi qu'un état des lieux des expositions à des risques particuliers (dont les rayonnements ionisants) qui est ensuite versé au dossier médical de santé au travail (DMST) pour traçabilité.

Suite à cette visite et surtout à cet état des lieux des expositions, le médecin du travail peut décider de proposer un suivi post-exposition ou un suivi post-professionnel (dans ce cas, en lien avec le médecin traitant et le médecin conseil de la Sécurité sociale) dont la périodicité et le contenu, notamment en termes d'examens complémentaires, n'est pas réglementairement défini pour les rayonnements ionisants, notamment, et laissé à l'appréciation des professionnels réalisant ce suivi.

Lors de la visite médicale préalable à la cessation d'exposition, le médecin du travail réalise un état des lieux des expositions aux risques professionnels, y compris les rayonnements ionisants. Concernant les rayonnements ionisants, cet état des lieux doit comprendre : la nature des rayonnements et leur intensité, la durée d'exposition, la fréquence d'exposition, les résultats dosimétriques, la nature des tâches ainsi que les équipements de protection

utilisés, les incidents tels que les expositions imprévues ou les dépassements de doses, ou encore le contenu du suivi périodique en santé au travail (examen clinique, bilans biologiques, examens complémentaires). Ce document, intégré au DMST, est crucial pour la traçabilité de ces expositions et servira de base pour décider du type de suivi post-professionnel à mettre en place, le cas échéant. Le médecin du travail peut inclure des recommandations spécifiques à transmettre au médecin traitant, par courrier avec accord du salarié, telles que des examens complémentaires à réaliser ou une périodicité des visites à mettre en place.

B. Dépistage et prévention des principales pathologies retrouvées dans la synthèse de la littérature

1. Cancer du poumon

A ce jour, il n'existe pas en FRANCE, de dépistage organisé du cancer du poumon. Il n'existe donc pas de recommandation concernant les examens complémentaires à effectuer ni la périodicité de leur réalisation dans le cadre d'un dépistage systématique.

Toutefois, la Haute Autorité de Santé (HAS), dans la révision 2021 de son avis de 2016 sur le dépistage du cancer broncho-pulmonaire par scanner thoracique faible dose sans injection (114) recommande la mise en place d'une expérimentation.

En effet, le dépistage par scanner thoracique *low-dose* du cancer broncho-pulmonaire sur des populations ciblées (après un certain âge et fumeurs) semble diminuer la mortalité spécifique et entraîner également une diminution du taux de détection à un stade avancé.

Plusieurs études de cohorte sont en cours au niveau international à ce sujet. Par exemple, les résultats de l'étude NELSON, publiés en janvier 2020, confirment que le dépistage du

cancer du poumon par TDM low-dose aurait permis de diminuer de 25 % la mortalité liée à cette pathologie. (115)

Elle ne propose pas de modalités d'organisation de ce dépistage.

2. Autres pathologies

Pour l'ensemble des pathologies retrouvées dans ce travail de recherche, il n'existe pas, ni France ni au niveau international, de dépistage organisé.

Pour les cancers des os, comme l'ostéosarcome, le diagnostic repose sur l'imagerie médicale (radiographie, scanner, IRM). (116) En raison de leur rareté et du manque de critères adaptés, aucune recommandation n'est retrouvée, malgré des risques identifiés.

Il en est de même pour les leucémies ; leur diagnostic repose sur des examens comme le myélogramme et la numération formule sanguine, également utilisés pour le suivi post-traitement. (117)

Concernant les maladies cardiovasculaires, même si un dépistage organisé n'existe pas, de nombreux programmes nationaux visent à réduire les facteurs de risque modifiables tels que le tabagisme, le diabète et l'obésité. Le dépistage de ces maladies se fait plutôt par un examen clinique cardiovasculaire, un ECG et des analyses sanguines. (118,119)

Pour les troubles cognitifs, des tests comme le MMSE⁴⁸ (test de FOLSTEIN) sont facilement accessibles pour les soignants afin de détecter une altération d'une ou plusieurs fonctions cognitives (comme la mémoire, l'attention, le langage, la gnose, la praxie, le raisonnement,

⁴⁸ Mini Mental State Examination.

ou le jugement) et/ou des aspects comportementaux (tels que la personnalité ou les affects).

(120) Ces tests ne sont toutefois pas validés dans le cadre d'un dépistage systématiques.

Enfin, bien qu'il n'y ait pas de dépistage systématique pour la cataracte, un examen ophtalmologique tous les deux ans est recommandé par le Ministère de la santé à partir de 65 ans. (121)

C. Proposition de suivi post-professionnel / post-exposition à partir des données de la littérature

1. Processus de réflexion

Compte-tenu des résultats de cette synthèse de la littérature, il apparaît que le radium, le radon et les rayonnements ionisants peuvent être pourvoyeurs de pathologies graves pour les salariés y ayant été exposés au cours de leur carrière.

Malheureusement, il n'existe pas de consensus scientifique ni de protocole validé pour le suivi post-exposition / post-professionnel, notamment en ce qui concerne les expositions aux radiations. Il n'existe pas, non plus, de recommandation en matière de dépistage pour les principales pathologies liées aux rayonnements ionisants retrouvées dans la littérature et qui aurait pu aboutir à la mise en place d'un protocole spécifique de suivi médical des salariés dans ce contexte d'exposition.

En dehors de la classification des salariés en catégories A ou B et de la surveillance dosimétrique, il n'y a pas de règle ni de recommandation quant au contenu du suivi individuel des salariés exposés aux rayonnements ionisants. Celui-ci est laissé à l'appréciation du médecin du travail.

Afin de proposer un protocole de suivi post-exposition / post-professionnel, il est donc nécessaire de s'appuyer sur les données de la littérature en matière de risques liés aux rayonnements ionisants, sur les examens complémentaires faciles d'accès, peu invasifs et peu irradiants⁴⁹ les plus pertinents pour dépister ou diagnostiquer les pathologies et sur les protocoles de suivi post-professionnel / post-exposition existant pour des pathologies similaires.

2. Suivis post-exposition amiante et benzène

L'amiante et le benzène, respectivement des expositions pouvant causer un cancer broncho-pulmonaire et des leucémies, sont des expositions professionnelles dont le suivi post-exposition bénéficie de recommandations claires de la part de la HAS.

Pour les personnes ayant été exposées à l'amiante de manière active pendant au moins un an, il est recommandé de réaliser un scanner thoracique (TDM) *low-dose* initial. Cette évaluation doit être effectuée après une période de latence minimale de 30 ans pour les expositions intermédiaires et de 20 ans pour les expositions fortes. Si le TDM thoracique initial ne révèle aucune anomalie, il est conseillé de répéter cet examen tous les 5 ans pour les expositions fortes à l'amiante, et tous les 10 ans pour les autres types d'exposition.(122)

Concernant le benzène, la HAS recommande un suivi médical tous les deux ans incluant un examen clinique et une NFS+plaquettes.

⁴⁹ Afin de remporter l'adhésion des salariés dans ce suivi.

3. Maladies professionnelles en lien avec les rayonnements ionisants

Il est à noter qu'il existe un tableau de maladie professionnelle concernant les affections provoquées par les rayonnements ionisants (Tableau N°6 du Régime Général ; Tableau N°20 du Régime Agricole) (123), mais ce tableau n'impose aucun examen complémentaire particulier pour poser le diagnostic des affections listées. Les affections pouvant être reconnues comme maladies professionnelles en lien avec les rayonnements ionisants sont : anémie, leucopénie, thrombopénie, syndrome hémorragique consécutif à une irradiation aiguë ou chronique, blépharite, conjonctivite, kératite, cataracte, radiodermites aiguës ou chroniques, radiolésions aiguës ou chroniques des muqueuses, radionécrose osseuse, leucémie, cancer broncho-pulmonaire primitif et sarcome osseux. Parmi toutes ces affections, sept d'entre elles ont un délai de prise en charge suffisamment long pour pouvoir les inclure dans un protocole de suivi post-exposition / post-professionnel (cataracte, radiodermites chroniques, radiolésions chroniques des muqueuses, radionécrose osseuse, leucémie, cancer broncho-pulmonaire primitif et sarcome osseux).

4. Protocole proposé

Le protocole de suivi post-exposition / post-professionnel proposé suite à ce travail de recherche peut être le suivant :

- Pour une exposition professionnelle à de très faibles doses ($< 1 \text{ mSv.an}^{-1}$) de rayonnements ionisants (radium et radon compris) : pas de suivi spécifique à mettre en place en raison d'un cumul annuel de doses reçues équivalent, au maximum, au seuil recommandé pour la population générale qui ne bénéficie pas d'un suivi médical ;

- Pour une exposition professionnelle à de faibles doses ($< 100 \text{ mSv.an}^{-1}$) de rayonnements ionisants (radium et radon compris) : des examens complémentaires pourraient être prescrits par le médecin du travail lors de la visite préalable à la mise en place du suivi post-professionnel / post-exposition. La réalisation de ces examens permettrait de faire un bilan de santé complet et d'avoir des examens de référence, certainement normaux, proches de la fin d'exposition. La périodicité du suivi pourrait ensuite s'aligner sur celle des expositions faibles à intermédiaires pour l'amiante et avoir lieu tous les 10 ans en ce qui concerne le risque de cancer du poumon et sur la législation de 1995 relative au suivi post-professionnel en ce qui concerne le risque de leucémie, ce qui permet de coller également au suivi « benzène », avec une périodicité de deux ans. Le risque oculaire pourrait s'aligner sur les recommandations du gouvernement en matière de consultation ophtalmologique. Les examens complémentaires proposés sont ceux qui permettraient de dépister ou de diagnostiquer les maladies liées à une exposition professionnelle aux rayonnements ionisants tout en étant faciles d'accès pour les salariés et de faible coût ;

- Pour une exposition professionnelle à de fortes doses ($\geq 100 \text{ mSv.an}^{-1}$) de rayonnements ionisants (radium et radon compris) : le raisonnement est le même en ce qui concerne le risque de leucémie et de cataracte. Il serait envisageable de ne proposer un scanner thoracique que toutes les deux visites de suivi afin d'éviter un nombre trop important d'exams irradiants, bien que les dernières technologies *low-doses* ne présentent que peu de risques. Cette périodicité propre au scanner permettrait également de se rapprocher des recommandations en matière de suivi « amiante » pour les expositions fortes.

En ce qui concerne les cancers osseux, il ne semble pas exister de d'examen permettant de déceler des signes précoces de lésion osseuse. Par ailleurs, le caractère aléatoire de leur localisation nécessiterait la réalisation d'un nombre trop important de radiographies, augmentant par conséquent les doses⁵⁰ de radiation reçues par les salariés.

Le suivi proposé dans ce travail est résumé dans le tableau suivant [Tableau 11].

Dose reçue	Pathologie dépistée	Modalités de dépistage	Suivi
Très faibles dose < 1 mSv.an ⁻¹	Aucune	Pas de dépistage	Pas de suivi
Faibles doses < 100 mSv.an ⁻¹	Cancer du poumon	TDM thoracique	Visite préalable puis tous les 10 ans
	Maladies cardiovasculaires	Examen clinique cardiovasculaire + bilan sanguin en fonction des facteurs de risques cardiovasculaires	
	Radiolésions cutanées et muqueuses	Examen clinique de la peau et des muqueuse	
	Troubles cognitifs	Réalisation d'un MMSE	
	Cataracte	Examen ophtalmologique	Visite préalable puis tous les 2 ans
	Leucémie	NFS+plaquettes	
	Cancers osseux / radionécrose	Radiographie osseuse	Non réalisée
Fortes doses ≥ 100 mSv.an ⁻¹	Cancer du poumon	TDM thoracique	Visite préalable puis tous les 4 ans
	Leucémie	NFS+plaquettes	
	Maladies cardiovasculaires	Examen clinique cardiovasculaire + bilan sanguin en fonction des facteurs de risques cardiovasculaires	Visite préalable puis tous les 2 ans
	Cataracte	Examen ophtalmologique	
	Radiolésions cutanées et muqueuses	Examen clinique de la peau et des muqueuse	
	Troubles cognitifs	Réalisation d'un MMSE	
	Cancers osseux / radionécrose	Radiographie osseuse	Non réalisée

Tableau 11 - Examens complémentaires proposés dans le cadre du suivi post-exposition / post-professionnel aux rayonnements ionisants.

Les propositions formulées précédemment présentent plusieurs limitations importantes, notamment sur le plan scientifique et méthodologique. La plupart de ces propositions ne s'appuient sur aucune recommandation officielle et n'ont fait l'objet d'aucune étude ni validation. De plus, l'approche présentée est purement empirique.

⁵⁰ La dose moyenne reçue par acte de radiologie étant de 0,5 mSv selon la Société Française de Radiologie.

Ces propositions ne tiennent pas compte du type d'exposition (externe ou interne) ni des facteurs individuels et environnementaux des populations exposées (notamment le tabagisme).

5. Distinction entre dépistage et diagnostic

Le dépistage est une approche de santé publique visant à identifier de manière précoce des maladies ou des facteurs de risque au sein d'une population qui ne présente pas encore de symptômes. Il est souvent réalisé à grande échelle, comme pour les cancers ou les maladies chroniques, afin de réduire la morbidité et la mortalité par une prise en charge précoce. Les critères définis par la HAS pour un bon programme de dépistage incluent notamment une maladie à incidence élevée, un test de dépistage validé, et la possibilité d'intervenir de manière bénéfique après détection.

En revanche, le diagnostic est une étape clinique plus ciblée qui intervient après l'apparition de symptômes ou en cas de résultats anormaux issus d'un dépistage. Il consiste à confirmer ou infirmer la présence d'une pathologie précise, généralement par des examens plus approfondis et spécifiques.

Ainsi, le dépistage est une mesure préventive et populationnelle, tandis que le diagnostic est un processus de confirmation individuel, souvent plus invasif et orienté par des signes cliniques.

Le suivi post-professionnel en FRANCE vise à dépister précocement des maladies professionnelles ou liées au travail avant l'apparition de symptômes cliniques, afin de prendre des mesures préventives ou curatives rapides. Ce processus repose sur des examens réguliers et spécifiques pour les pathologies correspondant aux risques auxquels l'ancien salarié a été exposé.

6. Pertinence du dépistage

La question de la pertinence de développer un dépistage sans consensus est complexe, notamment dans le cadre de la santé publique. Ce type d'approche sans consensus établi soulève plusieurs enjeux, tels que l'absence de directives claires sur la périodicité et les examens complémentaires à réaliser. La balance entre les bénéfices attendus et les risques d'examens répétés non encadrés est à considérer attentivement. Dans ce contexte, la prudence est de mise avant de généraliser un dépistage, car il pourrait entraîner des surdiagnostics ou des effets indésirables liés à des examens invasifs ou non nécessaires.

Il est donc nécessaire de mener de nouvelles études permettant de conduire à une validation rigoureuse des examens proposés, en particulier en termes de bénéfices pour la santé publique.

VIII. Discussion

L'analyse des études sur les effets de l'exposition au radium et au radon révèle plusieurs lacunes importantes dans les connaissances actuelles, qui limitent la compréhension des risques associés à ces expositions. Ces lacunes concernent principalement les expositions à faible dose (<100 mSv), l'hétérogénéité des unités de mesure, la variabilité des réponses individuelles, les biais d'études, ainsi que l'absence de suivi post-exposition adapté. Ces différents points soulignent la nécessité de recherches supplémentaires pour approfondir la compréhension des risques liés à ces expositions et pour proposer des recommandations en matière de prévention.

De nombreuses études se concentrent sur les effets des expositions à des doses élevées, particulièrement dans des contextes professionnels comme l'industrie minière ou la production d'énergie nucléaire. Cependant, il existe un manque significatif de données sur les effets à long terme des expositions à très faible dose, qui sont plus représentatives des expositions domestiques, environnementales, ou de certains contextes professionnels, comme en milieu hospitalier. Les faibles doses, bien que moins dangereuses en apparence, peuvent néanmoins avoir des effets cumulatifs, qui ne se manifestent qu'après plusieurs décennies. Actuellement, peu d'études longitudinales sont menées sur des populations exposées à des doses faibles de radium et de radon. Ces études seraient essentielles pour comprendre la relation dose-réponse à de faibles niveaux, notamment en ce qui concerne les risques de cancers (cancers du poumon, leucémies), de maladies cardiovasculaires, et d'effets neurocognitifs. Le manque de données sur les faibles doses limite la capacité à établir des recommandations de santé publique précises et adaptées à ces types d'exposition.

Un autre obstacle majeur à la compréhension des effets des radiations réside dans l'hétérogénéité des unités de mesure utilisées dans les différentes études. En effet, certaines études utilisent les millisieverts pour quantifier la dose efficace, tandis que d'autres emploient des unités spécifiques comme les WLM pour mesurer l'exposition au radon, ou encore des becquerels pour quantifier l'activité radioactive. Cette diversité d'unités complique la comparaison des résultats entre les différentes études. Par exemple, il est souvent difficile de comparer les risques associés à une exposition mesurée en millisieverts avec ceux mesurés en WLM, car ces unités ne sont pas directement convertibles sans des informations supplémentaires complexes. L'hétérogénéité des unités de mesure limite donc la possibilité de tirer des conclusions claires et de proposer des recommandations cohérentes. De plus, les différences dans les méthodes de calcul et d'estimation des doses cumulatives, ainsi que la manière dont les expositions sont rapportées (qu'elles soient professionnelles, domestiques ou environnementales), aggravent ce problème. Il serait essentiel, dans les futures recherches, d'harmoniser les unités de mesure et de normaliser les méthodes d'évaluation des doses afin de faciliter la comparaison des résultats et d'en améliorer l'interprétation.

Un autre domaine souvent sous-estimé dans les études concerne la variabilité des réponses individuelles à l'exposition au radium et au radon. Bien que les études fournissent généralement des estimations globales des risques, elles négligent souvent les facteurs pouvant influencer la sensibilité individuelle aux radiations. Par exemple, des facteurs génétiques peuvent moduler la réponse individuelle aux radiations, tout comme les conditions de santé préexistantes ou les comportements liés au mode de vie, tels que le tabagisme. Ces variables sont souvent sous-explorées dans les études actuelles, bien qu'elles puissent avoir une grande importance dans l'évaluation des risques. Par conséquent, des études épidémiologiques plus détaillées sont nécessaires pour identifier les sous-groupes de

population particulièrement vulnérables à l'exposition au radium et au radon. Cela permettrait d'adapter les recommandations de suivi et de protection en fonction des caractéristiques individuelles des populations concernées, ce qui est essentiel pour une gestion personnalisée et plus efficace des risques.

De plus, certaines études portant sur des cohortes spécifiques, telles que les mineurs d'uranium ou les travailleurs de l'industrie nucléaire, sont limitées par des biais de sélection et une variabilité importante entre les cohortes. Ces biais de sélection peuvent affecter la généralisation des résultats, rendant difficile l'application des conclusions à d'autres groupes de population, notamment ceux exposés dans des contextes différents. Les recherches futures devraient s'efforcer de minimiser ces biais. Par ailleurs, la réalisation de méta-analyses regroupant les données issues de plusieurs cohortes internationales pourrait contribuer à renforcer la robustesse des conclusions en fournissant une image plus complète des risques associés à l'exposition au radium et au radon.

La majorité des recherches sur l'exposition au radium et au radon se concentre sur le risque de cancer, en particulier les cancers du poumon et les leucémies. Toutefois, il existe un manque notable d'études systématiques sur les autres effets non cancéreux de ces expositions, tels que les maladies cardiovasculaires, les troubles respiratoires et les effets neurocognitifs. Bien que ces pathologies soient souvent moins mortelles que les cancers, elles peuvent avoir un impact significatif sur la qualité de vie des personnes exposées. Il est donc crucial d'élargir le champ des recherches pour mieux comprendre ces effets non cancéreux et développer des recommandations de suivi plus globales, qui prendraient en compte l'ensemble des risques pour la santé des individus exposés, et pas seulement le risque de cancer.

Concernant le suivi post-exposition, bien que certaines propositions existent, il y a peu de données empiriques sur l'efficacité des interventions de suivi dans la prévention des effets à long terme de l'exposition au radium et au radon. De plus, les stratégies de suivi ne sont pas toujours adaptées aux besoins spécifiques des populations les plus à risque. Il est donc nécessaire de mener des études pour évaluer l'efficacité des différentes stratégies de prévention. Ces recherches devraient permettre de développer des protocoles de dépistage, de surveillance médicale, ainsi que des différentes interventions préventives. En outre, il serait utile de développer des modèles de suivi personnalisés, ajustés notamment en fonction des doses reçues et des caractéristiques individuelles. Ces études pourraient également servir à formuler des recommandations en termes de suivi post-exposition.

Au total, les lacunes identifiées dans les recherches actuelles sur l'exposition au radium et au radon soulignent la nécessité d'études supplémentaires pour améliorer notre compréhension des risques associés à ces expositions, en particulier concernant les faibles doses. En outre, des études sont nécessaires pour mettre en place des stratégies de suivi post-exposition. Ces recherches contribueraient à améliorer notre compréhension des risques et à renforcer les politiques de santé publique visant à protéger les populations exposées, tout en optimisant les stratégies de prévention et de surveillance. En particulier dans le cadre la médecine du travail qui joue un rôle crucial dans la gestion des risques liés à l'exposition aux rayonnements ionisants, notamment à de faibles doses. Il est essentiel que des protocoles spécifiques de suivi soient mis en place pour les travailleurs exposés dans des secteurs tels que l'industrie nucléaire, la radiologie médicale, ou l'extraction minière. Les médecins du travail doivent être formés à détecter précocement les signes de pathologies liées aux radiations, y compris les cancers, les maladies cardiovasculaires et les troubles neurocognitifs. Un suivi médical régulier est indispensable pour prévenir ou gérer les effets à long terme de

ces expositions. L'intégration des avancées scientifiques issues de la recherche sur les faibles doses dans la pratique de la médecine du travail permettrait d'adapter les protocoles de surveillance aux besoins des travailleurs, en fonction des niveaux d'exposition et de leur durée. En mettant en œuvre des stratégies de surveillance proactive, il serait possible de minimiser les impacts sur la santé à long terme des personnes exposées et de mieux gérer les risques professionnels liés aux radiations.

L'objectif principal de cette thèse était d'explorer les effets sanitaires potentiels de la contamination historique au radium et au radon dans un bâtiment hospitalier, ainsi que d'évaluer les mesures de prévention en vigueur. À travers une synthèse de la littérature, ce travail a mis en lumière plusieurs aspects essentiels de cette problématique complexe, tout en identifiant des lacunes importantes dans la recherche actuelle, et en proposant des recommandations pour la pratique et la recherche future. Les résultats de cette étude bibliographique confirment que l'exposition professionnelle au radium et au radon peut avoir des effets sanitaires significatifs, même à des doses relativement faibles, en particulier lorsqu'elle se prolonge sur de longues périodes. Les effets les plus préoccupants incluent les cancers du poumon, des os et les cancers hématologiques. Ces conclusions sont en accord avec les études antérieures qui ont documenté des effets similaires dans d'autres contextes d'exposition professionnelle et environnementale.

Cependant, l'analyse des données disponibles a révélé une grande hétérogénéité dans la qualité et la méthodologie des études, compliquant l'élaboration de conclusions définitives, en particulier en ce qui concerne les seuils d'exposition sûrs et les effets à long terme de l'exposition à faibles doses. De plus, la majorité des études disponibles se concentre sur des cas historiques bien documentés ou sur des environnements industriels, ce qui laisse une

lacune importante concernant les contextes spécifiques comme les établissements hospitaliers. Il apparaît donc nécessaire de conduire des études plus ciblées sur les populations hospitalières exposées, en particulier pour mieux comprendre les impacts sanitaires à long terme et les éventuels effets synergiques entre le radium et le radon.

De plus, certaines études manquent de rigueur dans le contrôle des facteurs de confusion, tels que le tabagisme ou d'autres expositions professionnelles aux agents cancérigènes, qui peuvent interagir avec l'exposition au radon pour augmenter le risque de cancer du poumon. Ce manque de prise en compte des cofacteurs crée un biais d'information qui peut entraîner des estimations incorrectes de la relation entre l'exposition au radium, au radon et les effets sanitaires. La variabilité des méthodologies employées dans ces études complique également l'interprétation des résultats. Par exemple, les méthodes utilisées pour estimer les doses d'exposition varient d'une étude à l'autre, allant de mesures directes sur les lieux de travail à des reconstructions basées sur des archives historiques. Cette diversité des approches rend difficile la comparaison entre les études et affaiblit la robustesse des conclusions.

Les études historiques incluses dans cette thèse se basent souvent sur des cohortes de travailleurs exposés dans des contextes différents, ce qui pose un problème de comparabilité. Une des limites notables des études examinées est le manque de données sur les expositions récentes dans les environnements hospitaliers. Si des études historiques existent pour les sites industriels et militaires, peu de recherches se concentrent sur les établissements hospitaliers modernes. Cette absence de données contemporaines constitue une lacune importante, car elle limite la capacité à établir des recommandations précises pour les travailleurs hospitaliers exposés à une pollution historique au radium et au radon aujourd'hui. En effet, il existe de grandes différences entre les contextes d'exposition historiques, souvent marqués par une

exposition à des niveaux élevés de radiation, et les contextes hospitaliers actuels, où les expositions sont généralement plus faibles et souvent accidentelles.

Une autre lacune importante identifiée est l'absence d'études empiriques contemporaines dans des bâtiments hospitaliers similaires à celui étudié dans cette thèse. La majorité des études analysées se basent sur des mesures réalisées dans le passé ou dans des environnements industriels, ce qui limite la généralisation des résultats au contexte hospitalier actuel. Cette absence de données récentes rend difficile l'évaluation précise des risques pour les professionnels de santé travaillant dans des bâtiments contaminés, notamment ceux dont la contamination est récente et potentiellement encore active. Il aurait été bénéfique pour cette thèse de compléter la synthèse de la littérature par des mesures contemporaines de radioactivité dans d'autres bâtiments hospitaliers similaires afin de mieux évaluer les niveaux d'exposition actuels et les risques associés.

L'absence de mesures contemporaines limite non seulement la validité des conclusions, mais soulève également des questions quant à l'évolution des niveaux de contamination au fil du temps. Par exemple, dans le cas du bâtiment « ex-oncologie », les évaluations des doses reçues sont basées sur des estimations réalisées a posteriori, sans mesures directes à l'époque de l'exposition. Il est donc possible que les niveaux de radioactivité aient changé au fil des années en raison de processus naturels comme la décroissance radioactive ou des interventions humaines visant à limiter l'exposition. Par conséquent, des études supplémentaires sont nécessaires pour évaluer de manière précise les niveaux d'exposition actuels dans les bâtiments hospitaliers contaminés et pour déterminer si des mesures de radioprotection supplémentaires sont nécessaires.

En ce qui concerne les mesures de prévention, ce travail a révélé que les protocoles actuels, bien qu'efficaces dans une large mesure, pourraient bénéficier d'améliorations. Les recommandations internationales et nationales en matière de radioprotection sont bien établies, mais la question du suivi en santé au travail n'est pas abordée, malgré les conséquences graves que peuvent avoir les expositions étudiées pour la santé des travailleurs. Il serait donc pertinent de développer des protocoles de suivi post-exposition plus systématiques, en particulier des travailleurs ayant été exposés à des doses plus élevées de radium ou de radon. Enfin, plusieurs pistes de recherche future ont été identifiées et pourraient contribuer à combler les lacunes actuelles. Il serait notamment utile de réaliser des études longitudinales sur les populations exposées en milieu hospitalier pour évaluer les effets sanitaires à long terme, ainsi que des recherches sur l'efficacité des différentes mesures de prévention actuellement en place.

Ce travail apporte une contribution à la compréhension de la contamination au radium et au radon en milieu hospitalier, tout en soulignant la nécessité d'une vigilance continue et d'une amélioration des pratiques en radioprotection. Les résultats de cette thèse devraient encourager des recherches supplémentaires et des mesures préventives renforcées pour protéger la santé des travailleurs hospitaliers et des patients. La thèse se distingue par une approche méthodologique robuste et bien structurée, offrant une synthèse approfondie sur la contamination au radium et au radon dans un cadre professionnel. Un des aspects les plus notables du travail est l'utilisation d'une synthèse de la littérature plutôt qu'une revue systématique. Cette approche est justifiée par la rareté et l'hétérogénéité des données disponibles, rendant nécessaire une méthodologie plus souple pour couvrir l'étendue du sujet.

La rigueur de l'approche scientifique est parfois compromise par la qualité variable des sources incluses. Cependant, cette faiblesse inhérente aux sources disponibles est compensée par la diversité des documents examinés, incluant à la fois des recherches historiques et des études contemporaines. Les résultats obtenus à partir de cette synthèse sont globalement bien argumentés et apportent un éclairage précieux sur les effets potentiels de la contamination au radium et au radon sur la santé des travailleurs hospitaliers. Un point fort majeur réside dans l'identification des effets à court et à long terme de l'exposition aux rayonnements ionisants, ainsi que des voies d'exposition spécifiques au radium et au radon en milieu hospitalier. Le travail met en évidence que, malgré des niveaux de radioactivité globalement faibles mesurés par des experts en radioprotection, certaines expositions pourraient justifier un suivi post-exposition pour les travailleurs les plus exposés. Cela constitue un argument fort pour la mise en place de protocoles de surveillance plus stricts dans les établissements hospitaliers concernés.

Cependant, les résultats auraient pu être renforcés par une étude empirique directe, par exemple par des mesures contemporaines de la radioactivité dans d'autres bâtiments similaires, afin de confirmer ou nuancer les conclusions tirées des données historiques et de la littérature existante. La principale faiblesse réside dans l'absence de données empiriques récentes, qui auraient ajouté une dimension quantitative plus rigoureuse à l'analyse qualitative effectuée. De plus, l'interprétation des données issues de différentes périodes et contextes géographiques pose un problème de comparabilité, ce qui limite quelque peu la portée des conclusions générales de la thèse.

Les propositions formulées dans cette thèse sont à la fois pratiques et bien ancrées dans les réalités de la radioprotection. Ce travail propose un suivi post-exposition ciblé pour les personnels ayant été les plus exposés, ce qui est une suggestion pertinente compte tenu des risques identifiés. Cette proposition est appuyée par une analyse détaillée des recommandations existantes en matière de radioprotection, tant au niveau national qu'international. La thèse propose également une révision des protocoles de suivi en santé au travail dans les hôpitaux, en prenant en compte les particularités de l'exposition au radium et au radon, ce qui est une contribution à la littérature existante sur la santé au travail. Cependant, une critique possible des recommandations est leur manque de détails concrets sur leur mise en œuvre. L'absence de recommandations opérationnelles précises pour gérer les cas de contamination au radium et au radon en milieu hospitalier est une faiblesse notable, car cela laisse les professionnels de la santé au travail sans directives claires pour adapter les politiques de radioprotection à ce type de contamination spécifique.

Concernant les investigations menées dans le bâtiment hospitalier au sein des HUS après la découverte d'une pollution radiologique historique en 2020, un travail très important a été mené depuis cette date pour essayer de reconstituer les événements ayant abouti à cette pollution datant notamment de l'utilisation du radium 226 en curiethérapie avant les années 1950 et évaluer les niveaux d'exposition des personnes ayant travaillé dans ce bâtiment et ceci jusqu'en 2019 date du transfert des activités d'oncologie sur un autre site.

Les expertises techniques, les différentes métrologies réalisées dans l'ensemble des locaux du bâtiment ont permis de retrouver essentiellement des points de contamination au radium dans certains secteurs des sous-sols en particulier dans des lieux de stockage des sources radioactives ou des déchets ou dans certaines parties des combles. Ces secteurs ne

comportaient pas de présence régulière de personnels, seuls certains personnels techniques ont pu y accéder et pour des interventions ponctuelles le plus souvent de simples contrôles. L'évaluation de leur exposition au risque radiologique a été considérée comme non significative du fait des durées brèves et peu fréquentes d'intervention. Ces professionnels techniques sont par ailleurs déjà suivis très régulièrement concernant leurs autres expositions en particulier à l'amiante.

Dans les locaux où travaillait la très grande majorité des personnels (médecins, soignants, secrétaires, psychologues, ...) à savoir bureaux ou salles de consultations, il n'a pas été retrouvé de niveaux significatifs de contamination au radium sauf dans un bureau du premier étage. La contamination retrouvée dans ce bureau provenait probablement de traces résiduelles de radium dans une zone du parquet. Les travaux effectués dans le bâtiment avec la pose de revêtements de sol soudés aux murs ont certainement permis de confiner cette contamination en dessous des revêtements. Il restait un très faible risque d'exposition externe au radium lors des métrologies actuelles mais pas de risque d'inhalation ou d'exposition interne de radium.

L'ensemble des calculs de doses, effectués par l'équipe de radiophysique et radioprotection avec une méthodologie validée par l'ASN, a permis une évaluation rétrospective de l'exposition à partir aussi des questionnaires collectés auprès des personnes ayant travaillé dans le bâtiment et ayant répondu à l'enquête. Cette évaluation rétrospective a pu être faite jusqu'en 1993, année d'arrêt des activités utilisant des sources radioactives.

Les résultats ont montré sur cette période des niveaux d'exposition inférieurs à la limite réglementaire pour le public et les travailleurs non classés comme exposés aux rayonnements ionisants qui est de 1 mSv.an^{-1} .

De ce fait, il a été proposé de tracer cette exposition accidentelle dans les dossiers de santé au travail des agents et de les informer individuellement sur les risques potentiels pour leur santé.

Toutefois étant donné les très faibles niveaux d'exposition, il n'a pas été proposé de dépistage systématique ou de suivi post professionnel particulier aux personnes ayant travaillé dans ce bâtiment sauf pour les professionnels ayant par ailleurs été exposés aux rayonnements ionisants du fait de leur activité connue en radiologie ou en curiethérapie.

Il reste une incertitude sur la période avant 1993 avec une méconnaissance des niveaux d'exposition induit par l'utilisation et le stockage des sources radioactives et une impossibilité à déterminer un niveau d'exposition fiable.

IX. Conclusion

Ce travail avait pour ambition d'évaluer l'état des connaissances actuelles sur les éventuelles conséquences sanitaires d'une contamination historique au radium et au radon survenue dans un bâtiment hospitalier, ainsi que d'examiner la nécessité d'instaurer un suivi post-exposition pour les personnels ayant été accidentellement exposés à ces substances radioactives.

La découverte fortuite en 2020 d'une contamination radioactive historique dans un bâtiment hospitalier qui avait dans le passé eu une activité de curiethérapie avec utilisation d'aiguilles de radium a motivé ce travail. Différents professionnels, notamment secrétaires, soignants, médecins, personnels techniques ont travaillé dans ce bâtiment et ont, sans le savoir, pu être exposés indirectement à des émissions radioactives, soit de radium, soit de radon ou des deux. A priori, cette exposition a été jugée comme très faible pour la très grande majorité d'entre eux, en dessous de 1 mSv.an^{-1} . Toutefois, des inquiétudes fortes ont été identifiées chez certains concernant les risques à long terme pour leur santé.

Il était de ce fait nécessaire de faire le point sur l'état actuel des connaissances sur les effets à long terme d'une exposition chronique à faibles doses aux rayonnements ionisants notamment au radium ou au radon et de rechercher d'éventuelles recommandations concernant le suivi post professionnel à mettre en place auprès des sujets exposés.

Ce travail s'est appuyé sur une revue approfondie de la littérature scientifique existante depuis 2020, complétée par une analyse des recommandations nationales et internationales en matière de radioprotection, afin de répondre aux questions posées.

Les résultats des 89 articles retenus montrent que, bien que la majorité des travailleurs concernés ait été exposée à des doses relativement faibles de rayonnements ionisants, il n'en demeure pas moins que même de faibles expositions peuvent entraîner des risques significatifs pour la santé, notamment quand il s'agit de radium ou de radon avec des émissions potentielles de rayonnements α et un risque d'exposition interne. Les pathologies potentiellement induites par une exposition au radium et au radon incluent, entre autres, les cancers pulmonaires, osseux, ainsi que certaines formes de cancers hématologiques. Ces conclusions sont en accord avec les études antérieures qui ont démontré que les expositions chroniques, même à des doses inférieures aux seuils réglementaires, peuvent conduire à des effets stochastiques, dont la survenue d'un cancer reste l'un des principaux risques.

Toutefois, il a également été mis en lumière plusieurs limites importantes dans la littérature scientifique analysée. En effet, les données disponibles sont souvent hétérogènes, ce qui complique l'interprétation des résultats et la comparaison entre les différentes études. Cette hétérogénéité souligne l'importance de développer des études plus robustes, notamment un suivi de cohortes de grande ampleur, qui permettraient de mieux comprendre les effets à long terme des faibles doses de radiation sur les populations exposées. Par ailleurs, l'absence de données spécifiques sur des situations analogues à celle étudiée ici de contamination historique de bâtiments au radium avec un suivi des personnels exposés renforce la nécessité de recherches supplémentaires dans ce domaine mais souligne également les difficultés à faire des préconisations pertinentes.

En termes de prévention et de suivi post-exposition, les recommandations retrouvées dans ce travail sont en phase avec les pratiques internationales en matière de radioprotection. La mise en place d'un suivi renforcé pour les personnels les plus exposés semble justifiée,

particulièrement pour ceux dont les doses d'exposition pourraient être proches des seuils à partir desquels des effets stochastiques pourraient être observés. Des préconisations ont été faites en matière de contenu de suivi qu'il serait pertinent de réaliser. Cependant, pour les personnels ayant été exposés à de très faibles doses, l'instauration d'un suivi se discute et nécessiterait davantage d'études de validation en termes de dépistage systématique en évaluant la balance bénéfiques-risques selon la nature de l'examen complémentaire préconisé.

Ce travail ouvre des perspectives de recherche, notamment sur la nécessité de disposer de davantage d'études d'évaluation à long terme des risques induits par des expositions à faibles doses de rayonnements ionisants en milieu hospitalier. L'enjeu principal pour l'avenir réside dans la mise en place de protocoles de recherche capables de combler les lacunes identifiées, tout en assurant une protection optimale des travailleurs exposés à ces risques.

VU

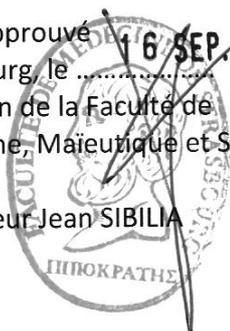
Strasbourg, le 12 septembre 2024
Le président du jury de thèse

Professeur Maria GONZALEZ



VU et approuvé
Strasbourg, le 16 SEP. 2024
Le Doyen de la Faculté de
Médecine, Maïeutique et Sciences de la Santé

Professeur Jean SIBILIA



ANNEXES

Annexe 1 – Alphabet grec

Majuscule	Minuscule	Dénomination	Majuscule	Minuscule	Dénomination
A	α	Alpha	Ν	ν	Nu
B	β	Bêta	Ξ	ξ	Ksi
Γ	γ	Gamma	Ο	ο	Omicron
Δ	δ	Delta	Π	π	Pi
E	ε	Epsilon	Ρ	ρ	Rhô
Z	ζ	Zêta	Σ	σ	Sigma
H	η	Êta	Τ	τ	Tau
Θ	θ	Thêta	Υ	υ	Upsilon
I	ι	Iota	Φ	φ	Phi
K	κ	Kappa	Χ	χ	Khi
Λ	λ	Lambda	Ψ	ψ	Psi
M	μ	Mu	Ω	ω	Oméga

Annexe 2 – Unités utilisées dans le manuscrit et leurs correspondances dans le SI

<u>Unités du système international</u>		
Grandeur	Unité	Symbole
Longueur	Mètre	m
Masse	Kilogramme	kg
Temps	Seconde	s
Courant électrique	Ampère	A
Température	Kelvin	K
Quantité de matière	Mole	mol
Intensité lumineuse	Candela	cd

<u>Unités utilisées dans le manuscrit</u>		
Unité	Symbole	Equivalent SI
Becquerel	Bq	$1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$
Electronvolt	eV	$1 \text{ eV} = 1,602177 \cdot 10^{-19} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
Gray	Gy	$1 \text{ Gy} = 1 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
Joule	J	$1 \text{ J} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
Sievert	Sv	$1 \text{ Sv} = 1 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
Vitesse de la lumière	c	$c = 299\,792\,458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Annexe 3 – Préfixes des unités du SI

Préfixe	Symbole	Equivalent
Femto-	f	$1 \cdot 10^{-15} = 0,000\,000\,000\,000\,001$
Pico-	p	$1 \cdot 10^{-12} = 0,000\,000\,000\,001$
Nano-	n	$1 \cdot 10^{-9} = 0,000\,000\,001$
Micro-	μ	$1 \cdot 10^{-6} = 0,000\,001$
Milli-	m	$1 \cdot 10^{-3} = 0,001$
Centi-	c	$1 \cdot 10^{-2} = 0,01$
Déci-	d	$1 \cdot 10^{-1} = 0,1$
(aucun)	(aucun)	$1 \cdot 10^0 = 1 \text{ (unité)}$
Déca-	da	$1 \cdot 10^1 = 10$
Hecto-	h	$1 \cdot 10^2 = 100$
Kilo-	k	$1 \cdot 10^3 = 1\,000$
Méga-	M	$1 \cdot 10^6 = 1\,000\,000$
Giga-	G	$1 \cdot 10^9 = 1\,000\,000\,000$
Téra-	T	$1 \cdot 10^{12} = 1\,000\,000\,000\,000$

Annexe 4 – Éléments chimiques et leurs symboles (tri alphabétique selon le symbole chimique)

Symbole	Élément chimique	Symbole	Élément chimique	Symbole	Élément chimique
Ac	Actinium	Ge	Germanium	Po	Polonium
Ag	Argent	H	Hydrogène	Pr	Praséodyme
Al	Aluminium	He	Hélium	Pt	Platine
Am	Américium	Hf	Hafnium	Pu	Plutonium
Ar	Argon	Hg	Mercure	Ra	Radium
As	Arsenic	Ho	Holmium	Rb	Rubidium
At	Astate	Hs	Hassium	Re	Rhénium
Au	Or	I	Iode	Rf	Rutherfordium
B	Bore	In	Indium	Rg	Roentgenium
Ba	Baryum	Ir	Iridium	Rh	Rhodium
Be	Béryllium	K	Potassium	Rn	Radon
Bh	Bohrium	Kr	Krypton	Ru	Ruthénium
Bi	Bismuth	La	Lanthane	S	Soufre
Bk	Berkélium	Li	Lithium	Sb	Antimoine
Br	Brome	Lr	Lawrencium	Sc	Scandium
C	Carbone	Lu	Lutécium	Se	Sélénium
Ca	Calcium	Lv	Livermorium	Sg	Seaborgium
Cd	Cadmium	Mc	Moscovium	Si	Silicium
Ce	Cérium	Md	Mendélévium	Sm	Samarium
Cf	Californium	Mg	Magnésium	Sn	Étain
Cl	Chlore	Mn	Manganèse	Sr	Strontium
Cm	Curium	Mo	Molybdène	Ta	Tantale
Cn	Copernicium	Mt	Meitnérium	Tb	Terbium
Co	Cobalt	N	Azote	Tc	Technétium
Cr	Chrome	Na	Sodium	Te	Tellure
Cs	Césium	Nb	Niobium	Th	Thorium
Cu	Cuivre	Nd	Néodyme	Ti	Titane
Db	Dubnium	Ne	Néon	Tl	Thallium
Ds	Darmstadtium	Nh	Nihonium	Tm	Thulium
Dy	Dysprosium	Ni	Nickel	Ts	Tennessee
Er	Erbium	No	Nobélium	U	Uranium
Es	Einsteinium	Np	Neptunium	V	Vanadium
Eu	Europium	O	Oxygène	W	Tungstène
F	Fluor	Og	Oganesson	Xe	Xénon
Fe	Fer	Os	Osmium	Y	Yttrium
Fl	Flérovium	P	Phosphore	Yb	Ytterbium
Fm	Fermium	Pa	Protactinium	Zn	Zinc
Fr	Francium	Pb	Plomb	Zr	Zirconium
Ga	Gallium	Pd	Palladium		
Gd	Gadolinium	Pm	Prométhium		

Annexe 5 – Checklist PRISMA-2020(124)

Section and Topic	Item #	Checklist item	Location where item is reported
TITLE			
Title	1	Identify the report as a systematic review.	
ABSTRACT			
Abstract	2	See the PRISMA 2020 for Abstracts checklist.	
INTRODUCTION			
Rationale	3	Describe the rationale for the review in the context of existing knowledge.	
Objectives	4	Provide an explicit statement of the objective(s) or question(s) the review addresses.	
METHODS			
Eligibility criteria	5	Specify the inclusion and exclusion criteria for the review and how studies were grouped for the syntheses.	
Information sources	6	Specify all databases, registers, websites, organisations, reference lists and other sources searched or consulted to identify studies. Specify the date when each source was last searched or consulted.	
Search strategy	7	Present the full search strategies for all databases, registers and websites, including any filters and limits used.	
Selection process	8	Specify the methods used to decide whether a study met the inclusion criteria of the review, including how many reviewers screened each record and each report retrieved, whether they worked independently, and if applicable, details of automation tools used in the process.	
Data collection process	9	Specify the methods used to collect data from reports, including how many reviewers collected data from each report, whether they worked independently, any processes for obtaining or confirming data from study investigators, and if applicable, details of automation tools used in the process.	
Data items	10a	List and define all outcomes for which data were sought. Specify whether all results that were compatible with each outcome domain in each study were sought (e.g. for all measures, time points, analyses), and if not, the methods used to decide which results to collect.	
	10b	List and define all other variables for which data were sought (e.g. participant and intervention characteristics, funding sources). Describe any assumptions made about any missing or unclear information.	
Study risk of bias assessment	11	Specify the methods used to assess risk of bias in the included studies, including details of the tool(s) used, how many reviewers assessed each study and whether they worked independently, and if applicable, details of automation tools used in the process.	
Effect measures	12	Specify for each outcome the effect measure(s) (e.g. risk ratio, mean difference) used in the synthesis or presentation of results.	
Synthesis methods	13a	Describe the processes used to decide which studies were eligible for each synthesis (e.g. tabulating the study intervention characteristics and comparing against the planned groups for each synthesis (item #5)).	
	13b	Describe any methods required to prepare the data for presentation or synthesis, such as handling of missing summary statistics, or data conversions.	
	13c	Describe any methods used to tabulate or visually display results of individual studies and syntheses.	
	13d	Describe any methods used to synthesize results and provide a rationale for the choice(s). If meta-analysis was performed, describe the model(s), method(s) to identify the presence and extent of statistical heterogeneity, and software package(s) used.	
	13e	Describe any methods used to explore possible causes of heterogeneity among study results (e.g. subgroup analysis, meta-regression).	
	13f	Describe any sensitivity analyses conducted to assess robustness of the synthesized results.	
Reporting bias assessment	14	Describe any methods used to assess risk of bias due to missing results in a synthesis (arising from reporting biases).	
Certainty assessment	15	Describe any methods used to assess certainty (or confidence) in the body of evidence for an outcome.	

Section and Topic	Item #	Checklist item	Location where item is reported
RESULTS			
Study selection	16a	Describe the results of the search and selection process, from the number of records identified in the search to the number of studies included in the review, ideally using a flow diagram.	
	16b	Cite studies that might appear to meet the inclusion criteria, but which were excluded, and explain why they were excluded.	
Study characteristics	17	Cite each included study and present its characteristics.	
Risk of bias in studies	18	Present assessments of risk of bias for each included study.	
Results of individual studies	19	For all outcomes, present, for each study: (a) summary statistics for each group (where appropriate) and (b) an effect estimate and its precision (e.g. confidence/credible interval), ideally using structured tables or plots.	
Results of syntheses	20a	For each synthesis, briefly summarise the characteristics and risk of bias among contributing studies.	
	20b	Present results of all statistical syntheses conducted. If meta-analysis was done, present for each the summary estimate and its precision (e.g. confidence/credible interval) and measures of statistical heterogeneity. If comparing groups, describe the direction of the effect.	
	20c	Present results of all investigations of possible causes of heterogeneity among study results.	
	20d	Present results of all sensitivity analyses conducted to assess the robustness of the synthesized results.	
Reporting biases	21	Present assessments of risk of bias due to missing results (arising from reporting biases) for each synthesis assessed.	
Certainty of evidence	22	Present assessments of certainty (or confidence) in the body of evidence for each outcome assessed.	
DISCUSSION			
Discussion	23a	Provide a general interpretation of the results in the context of other evidence.	
	23b	Discuss any limitations of the evidence included in the review.	
	23c	Discuss any limitations of the review processes used.	
	23d	Discuss implications of the results for practice, policy, and future research.	
OTHER INFORMATION			
Registration and protocol	24a	Provide registration information for the review, including register name and registration number, or state that the review was not registered.	
	24b	Indicate where the review protocol can be accessed, or state that a protocol was not prepared.	
	24c	Describe and explain any amendments to information provided at registration or in the protocol.	
Support	25	Describe sources of financial or non-financial support for the review, and the role of the funders or sponsors in the review.	
Competing interests	26	Declare any competing interests of review authors.	
Availability of data, code and other materials	27	Report which of the following are publicly available and where they can be found: template data collection forms; data extracted from included studies; data used for all analyses; analytic code; any other materials used in the review.	

Annexe 6 – Résumé synthétique des publications incluses dans le travail de thèse

ARTICLE	TITRE	AUTEURS	ANNEE DE PUBLICATION	TYPE DE PUBLICATION	POPULATION CONCERNEE	RISQUE ETUDE	OBJECTIF PRINCIPAL	RESULTATS ET CONCLUSION	BIAS	IMPACT FACTOR 2023
1	Administration of Lower Doses of Radium-224 to Ankylosing Spondylitis Patients Results in No Evidence of Significant Overall Detriment	Nicholas D. Priest; Lawrence T. Dauer; David G. Hoel	2020	Article de recherche	Patients atteints de spondylarthrite ankylosante	Radium	Évaluer les effets des faibles doses de radium-224 sur la mortalité globale chez les patients atteints de spondylarthrite ankylosante.	L'administration de faibles doses de radium-224 n'a pas eu d'impact négatif significatif sur la mortalité globale. Bien qu'un excès de leucémie ait été observé, le risque de décès par maladies non cancéreuses a été réduit, et aucun excès global de mortalité n'a été détecté.	Les différences potentielles entre les patients traités et non traités, telles que l'âge moyen et les traitements médicamenteux, pourraient avoir influencé les résultats. L'absence d'informations sur les traitements médicamenteux complique l'interprétation.	3,75
2	Accumulation of radium in ferruginous protein bodies formed in lung tissue: association of resulting radiation hotspots with malignant mesothelioma and other malignancies	Eizo Nakamura; Akio Makishima; Kyoko Hagino; Kazunori Okabe	2009	Article scientifique	Patients atteints de mésothéliome malin au Japon	Radium	Étudier l'accumulation de radium dans les corps protéiques ferrugineux formés dans les tissus pulmonaires et son association avec les hotspots de radiation et le développement de mésothéliome malin et d'autres cancers	L'étude montre que l'accumulation de radium dans les corps protéiques ferrugineux dans les poumons peut créer des hotspots de radiation qui augmentent le risque de dommages fréquents à l'ADN, entraînant ainsi le développement de mésothéliome et potentiellement d'autres types de cancers	l'hétérogénéité des expositions à l'amiante, ainsi qu'à l'absence de mesures précises de l'exposition cumulative au radium	3,54
3	Incidence of leukemia and other malignant diseases following injections of the short-lived emitter 224Ra into man	Roland R. Wick; M. J. Atkinson; E. A. Nekolla	2009	Article de recherche	Patients atteints de spondylarthrite ankylosante en Allemagne	Radium	Évaluer l'incidence de la leucémie et d'autres maladies malignes chez les patients ayant reçu des injections de 224Ra	L'étude a montré une augmentation significative des cas de leucémie, en particulier de leucémie myéloïde aiguë, chez les patients exposés au 224Ra par rapport au groupe de contrôle non exposé	Biais liés à la sélection des patients et à l'hétérogénéité des doses administrées	1,75
4	Increased risk of myeloid leukaemia in patients with ankylosing spondylitis following treatment with radium-224	R. R. Wick; E. A. Nekolla; M. Gaubitz; T. L. Schulte	2008	Étude épidémiologique prospective	Patients atteints de spondylarthrite ankylosante (1471 patients traités et 1324 patients contrôlés)	Radium	Étudier les effets à long terme du traitement au radium-224 chez les patients atteints de spondylarthrite ankylosante	Le risque de leucémie myéloïde, en particulier de leucémie myéloïde aiguë, est significativement augmenté chez les patients exposés au radium-224.	Biais potentiels liés à la sélection des patients et à l'utilisation de traitements alternatifs, ainsi qu'à la précision des doses administrées.	3,46
5	Occupational exposures and non-Hodgkin's lymphomas: Canadian case-control study	Chandima P. Karunanayake; Helen H. McCluffie; James A. Dosman; John J. Spinelli; Punam Pahwa	2008	Article scientifique	Hommes dans six provinces du Canada ayant des expositions professionnelles à long terme	Radium	Étudier l'association entre le lymphome non hodgkinien (NHL) et les expositions professionnelles chez les hommes canadiens	L'étude montre une augmentation significative du risque de NHL associée à des professions telles que fermer et machiniste, et à une exposition continue aux radiations ionisantes (radium).	Les biais incluent la possibilité de biais de rappel, la classification erronée des expositions, et les limitations liées à la population de l'étude, composée uniquement d'hommes.	5,30
6	Cancer incidence after Nasopharyngeal Radium Irradiation	Cécile M. Ronckers; Flora E. van Leeuwen; Richard B. Hayes; Pieter G. Verduijn; Marilyn Stovall; Charles E. Land	2002	Article scientifique	Patients néerlandais traités par irradiation radium nasopharyngée, principalement dans l'enfance	Radium	Étudier l'incidence du cancer après l'irradiation au radium nasopharyngée chez des patients néerlandais	Les résultats montrent une augmentation modérée du risque de cancers du système lymphoprolifératif et hémato-poïétique, ainsi qu'une augmentation du risque de cancer du sein, mais aucune augmentation significative des risques de cancer de la tête et du cou.	Les biais incluent un faible nombre de cas de cancers pour certaines analyses, une durée de suivi limitée pour certains patients, et la difficulté à établir des tendances de dose-réponse en raison du faible nombre de cas.	4,82
7	Third mortality follow-up of the Mallinckrodt uranium processing workers, 1942-2019	Cato M. Milder; Sara C. Howard; Elizabeth D. Ellis; Ashley P. Golden; Sarah S. Cohen; Michael T. Mumma; Richard W. Leggett; Benjamin French; Lydia B. Zablotska; John D. Boice Jr.	2024	Article de recherche	2 514 travailleurs blancs de sexe masculin ayant travaillé au moins 30 jours entre 1942 et 1966 à l'usine de traitement de l'uranium de Mallinckrodt à St. Louis, MO.	Radium Radon Rayonnements ionisants	Mettre à jour les données sur la mortalité par cancer et non-cancer des travailleurs de Mallinckrodt potentiellement exposés aux radiations et à la silice, en suivant les décès jusqu'en 2019.	L'étude a révélé une association entre l'exposition aux radiations et le cancer du rein, ainsi qu'une augmentation significative des maladies cardiovasculaires avec la dose reçue au cœur. Aucun lien n'a été trouvé entre les radiations et le cancer du poumon. Les expositions à la silice étaient associées à des maladies rénales non malignes.	Les associations observées peuvent être influencées par des biais de confusion non mesurés, notamment le tabagisme, et les incertitudes concernant les doses de radiation, en particulier dans les premières années de l'étude.	2,47

8	Radium in the environment: exposure pathways and health effects	2012	2012	Article scientifique	Population exposée au radium dans l'environnement, y compris les travailleurs, les consommateurs de produits contaminés, et les résidents proches des sources de radium	Radium Rayonnements ionisants	Examiner les voies d'exposition au radium dans l'environnement et leurs effets sur la santé humaine, en mettant l'accent sur les cancéres des os, du poumon et des voies nasales.	Le radium est fortement associé à plusieurs types de cancéres, notamment les cancéres des os, du poumon et des voies nasales. Les populations exposées par inhalation, ingestion ou contact sont à risque, et même de faibles niveaux d'exposition peuvent présenter des dangers.	4,23
9	Breast cancer risk among Swedish hemangioma patients and possible consequences of radiation-induced genomic instability.	2009	2009	Article de recherche	Femmes suédoises traitées pour hémangiome dans l'enfance	Radium Rayonnements ionisants	Étudier le risque de cancer du sein chez les patientes suédoises atteintes d'hémangiome et les conséquences possibles de l'instabilité génomique induite par les radiations.	L'étude présente des incertitudes liées aux modèles utilisés, et la variabilité de l'exposition aux radiations entre les patients pourrait affecter les résultats.	5,31
10	Circulatory system disease mortality and occupational exposure to radon progeny in the cohort of Newfoundland Fluorspar Miners between 1950 and 2016		2023	Article scientifique	Mineurs de fluorspar de Terre-Neuve ayant travaillé entre 1950 et 2016	Radon	Analyser la relation entre l'exposition professionnelle au radon et la mortalité par maladies du système circulatoire chez les mineurs de fluorspar	L'étude n'a trouvé aucune association statistiquement significative entre l'exposition cumulative au radon et les décès par maladies du système circulatoire, y compris les maladies cardiaques ischémiques et les accidents vasculaires cérébraux.	3,22
11	Radon and Lung Cancer in the Pooled Uranium Miners Analysis (PUMA): Highy-exposed Early Miners and All Miners		2023	Article scientifique	Mineurs d'uranium masculins de sept cohortes en Amérique du Nord et en Europe	Radon	Quantifier l'association entre l'exposition au radon et la mortalité par cancer du poumon dans une étude groupée des mineurs d'uranium	L'étude confirme une relation linéaire entre l'exposition cumulée au radon et la mortalité par cancer du poumon, modifiée par des facteurs temporels et d'exposition.	4,20
12	Radon Exposure and Risk of Neurodegenerative Diseases Among Male Miners in Ontario, Canada: A Cohort Study		2023	Article de recherche	34 536 mineurs masculins de l'Ontario, Canada, ayant travaillé entre 1915 et 1988	Radon	Étudier l'association entre l'exposition professionnelle au radon et les maladies neurodégénératives telles que la maladie d'Alzheimer et la maladie de Parkinson chez les mineurs.	Possibilité de biais de confusion en raison d'autres expositions dans les mines (comme le gaz d'échappement de moteurs diesel), manque de données sur les facteurs de mode de vie comme le tabagisme, et incertitudes dans l'estimation de l'exposition au radon, en particulier après 1988.	3,08
13	Lung and extrathoracic cancer incidence among underground uranium miners exposed to radon progeny in the Pibram region of the Czech Republic: a case-cohort study		2022	Étude cas-cohorte	16 434 mineurs souterrains d'uranium employés en République tchèque entre 1946 et 1992	Radon	Estimer l'association entre l'exposition au radon et l'incidence des cancéres pulmonaires et extrathoraciques dans une cohorte de mineurs d'uranium, tout en examinant l'effet modificateur du tabagisme.	Biais potentiels liés à l'imprécision des associations dues aux faibles expositions au radon et à la variabilité des réponses selon le sous-type de cancer. De plus, l'effet de la confusion des expositions professionnelles et des erreurs de mesure d'exposition pourrait également influencer les estimations du risque.	4,20
14	Lung Cancer and Radon: Pooled Analysis of Uranium Miners Hired in 1960 or Later		2022	Article de recherche	Mineurs d'uranium au Canada, en République tchèque, en France, en Allemagne et aux États-Unis embauchés à partir de 1960	Radon	Étudier l'association entre l'exposition aux produits de fission du radon et la mortalité par cancer du poumon chez les mineurs d'uranium embauchés à partir de 1960	L'étude montre une augmentation linéaire du taux relatif de cancer du poumon en fonction de l'exposition cumulative aux produits de fission du radon. L'association est modifiée par l'âge atteint à l'exposition et le taux d'exposition annuel	6,46

15	Miner Studies and Radiological Protection Against Radon	D. Laurier; J.W. Marsh; E. Rage; L. Tomasek	2020	Article de recherche	Mineurs exposés au radon dans diverses cohortes internationales	Radon	Examiner les études épidémiologiques des mineurs pour évaluer les risques sanitaires associés au radon et leur contribution à la protection radiologique.	L'étude conclut que les cohortes de mineurs ont constamment démontré une association positive entre l'exposition cumulative au radon et la mortalité par cancer du poumon. Ces résultats ont largement contribué à la protection radiologique contre le radon. Les résultats suggèrent également que les études des mineurs embouchés plus récemment offrent des données de meilleure qualité pour estimer les risques liés au radon.	Les incertitudes liées aux mesures d'exposition dans les premières années d'exploitation minière sont un biais majeur. La qualité des données a nettement augmenté avec le temps, ce qui réduit les incertitudes dans les études de cohortes plus récentes.	1,26
16	Radon and cancer mortality among underground uranium miners in the Příbram region of the Czech Republic	Katlin Kelly-Reif; Dale P. Sandler; David Shore; Mary K. Schubauer-Berigan; Melissa A. Troester; Leena Nylander-French; David B. Richardson	2020	Étude de cohorte	16 434 mineurs souterrains d'uranium employés en République tchèque entre 1946 et 1992	Radon	Estimer l'association entre le radon et les cancers autres que le cancer du poumon chez une vaste cohorte contemporaine de mineurs d'uranium.	L'étude confirme l'association établie entre le radon et le cancer du poumon et suggère que le radon pourrait également être associé à d'autres types de mortalité par cancer, notamment la leucémie lymphoïde chronique (LLC) et le cancer extrathoracique.	Biais potentiels liés à l'imprécision des associations dues aux faibles expositions au radon, ainsi qu'à la variabilité des réponses selon le sous-type de cancer. De plus, l'effet de la confusion des expositions professionnelles et des erreurs de mesure d'exposition pourrait également influencer les estimations du risque.	3,08
17	Low radon exposures and lung cancer risk: joint analysis of the Czech, French, and Beaverlodge cohorts of uranium miners	Rachei S. D. Lane; Ladislav Tomásek; Lydia B. Zablotzka; Estelle Rage; Franco Momoli; Julian Little	2019	Article scientifique	Mineurs d'uranium des cohortes tchèque, française et Beaverlodge	Radon	Évaluer la relation entre l'exposition au radon à faibles doses et la mortalité par cancer du poumon chez les mineurs d'uranium	L'étude a trouvé une relation linéaire significative entre l'exposition au radon et la mortalité par cancer du poumon, avec un risque relatif accru même à faibles doses d'exposition.	Les biais incluent le manque de données individuelles sur le tabagisme, des incertitudes sur les mesures d'exposition au radon, et la limitation de l'analyse aux données agrégées.	3,22
18	Mortality and cancer incidence among underground uranium miners in the Czech Republic 1977-1992	Katlin Kelly-Reif; Dale P. Sandler; David Shore; Mary K. Schubauer-Berigan; Melissa A. Troester; Leena Nylander-French; David B. Richardson	2019	Étude de cohorte	16 434 mineurs souterrains d'uranium employés en République tchèque entre 1946 et 1992	Radon	Estimer les taux de mortalité et d'incidence du cancer parmi les mineurs d'uranium de Příbram par rapport aux taux nationaux.	Les mineurs de Příbram ont montré des taux de mortalité plus élevés pour toutes les causes, tous les cancers, le cancer du poumon, et les cancers extrathoraciques par rapport aux attentes basées sur les taux nationaux. Une augmentation de l'incidence du cancer de l'estomac, du foie et du rectum a également été observée.	Biais potentiels liés à l'exposition à des conditions de travail dangereuses, à la perte de temps-personne observée dans la cohorte, à l'hétérogénéité des réponses, et aux erreurs de classification des causes de décès. De plus, l'exclusion des travailleurs les plus susceptibles pourrait influencer les estimations.	4,20
19	Histopathologic Analysis of Lung Cancer Incidence Associated with Radon Exposure among Ontario Uranium Miners	Avinash Ramkissoon; Ganthika Navaranjan; Colin Berraout; Paul J. Villeneuve; Paul A. Demers; Minh T. Do	2018	Article de recherche	Mineurs d'uranium en Ontario, Canada	Radon	Examiner les risques de cancer du poumon par sous-types histologiques associés à l'exposition au radon chez les mineurs d'uranium de l'Ontario	L'incidence du cancer du poumon est fortement associée à l'exposition au radon, avec les risques les plus élevés observés pour les carcinomes pulmonaires à petites cellules.	Biais possibles en raison de l'absence de données individuelles sur le tabagisme, principal facteur de risque du cancer du poumon.	4,53
20	Mortality from cancers of the extra-thoracic airways in relation to radon progeny in the Wismut cohort, 1946-2008	Michaela Kreuzer; Florian Dufey; James W. Marsh; Dennis Novak; Maria Schneider; L. Walsh	2014	Article de recherche	58 630 travailleurs employés entre 1946 et 1989 chez Wismut	Radon	Examiner la relation entre les descendants du radon et les cancers des voies aériennes extra-thoraciques dans la cohorte Wismut, avec un suivi étendu jusqu'en 2008.	L'étude a révélé une légère augmentation de la mortalité par cancers des voies aériennes extra-thoraciques en relation avec l'exposition cumulative au radon, bien que l'augmentation ne soit pas statistiquement significative. L'analyse a montré un risque relatif excessif par mois de niveau de travail (WLM) de 0,036, mais avec une faible puissance statistique.	Faible puissance statistique en raison du faible nombre de décès et absence de données sur les facteurs de confusion tels que la consommation d'alcool et le tabagisme, qui pourraient avoir influencé les résultats.	2,47
21	Lung cancer mortality in the European uranium miners cohorts analyzed with a biologically based model taking into account radon measurement error	W. F. Heidenreich; L. Tomasek; B. Grosche; K. Leuraud; D. Laurier	2012	Article de recherche	Travailleurs des mines d'uranium en République tchèque, en France et en Allemagne	Radon	Analyser la mortalité par cancer du poumon chez les mineurs européens à l'aide d'un modèle basé sur la biologie, en tenant compte des erreurs de mesure du radon	L'étude indique une action significative du radon sur la promotion du cancer du poumon, avec des différences observées entre les cohortes selon les erreurs de mesure et les modèles biologiques appliqués	Biais potentiels liés aux erreurs de mesure du radon, aux différences dans les estimations des expositions annuelles, et aux variations dans la méthodologie de collecte des données entre les cohortes nationales.	1,75
22	Incidence of non-lung solid cancers in Czech uranium miners: a case-cohort study	M. Kulich; V. Řeřicha; R. Řeřicha; D.L. Shore; D.P. Sandler	2011	Étude cas-cohorte	22 816 mineurs de la région de Příbram, République tchèque	Radon	Évaluer le risque de cancers solides non pulmonaires chez les mineurs de l'uranium exposés chroniquement au radon	Aucun type de cancer n'a été significativement associé à l'exposition au radon, bien qu'une association positive non significative ait été observée pour le mélanome malin et le cancer de la vésicule biliaire	Biais potentiels liés à la perte de sujets au suivi, à l'incertitude dans les estimations de l'exposition au radon et à la variabilité des habitudes de tabagisme	8,88

23	Radon and risk of death from cancer and cardiovascular diseases in the German uranium miners cohort study: follow-up 1946–2003	Michaela Kreuzer, B. Grosche, M. Schneider, A. Tschense, F. Dufey, L. Walsh	2010	Article de recherche	Mineurs d'uranium allemands employés chez Wismut de 1946 à 1989	Radon	Évaluer le risque de mortalité par cancer et maladies cardiovasculaires en relation avec l'exposition au radon chez les mineurs d'uranium allemands	L'étude a trouvé une <u>augmentation significative du risque</u> de cancer du poumon en lien avec l'exposition au radon. Un risque accru a également été observé pour les cancers des voies aériennes extrathoraciques, mais aucun <u>risque accru pour les maladies cardiovasculaires</u> n'a été noté	Biais potentiels liés à la qualité des certificats de décès, à la classification des expositions, et à la prise en compte des expositions précoces et aux poussières fines	1,75
24	The Radon Issue: Considerations on Regulatory Approaches and Exposure Evaluations on the Basis of Recent Epidemiological Results	Francesco Bochicchio	2008	Article de recherche	Populations exposées au radon dans les habitations	Radon	Examiner les récentes découvertes épidémiologiques sur les risques de cancer du poumon associés au radon et discuter des implications pour les approches réglementaires et les politiques futures de contrôle du risque lié au radon.	L'étude conclut que l'exposition au radon à des niveaux modérés augmente significativement le risque de cancer du poumon, <u>en particulier lorsqu'elle est combinée avec le tabagisme</u> . Les politiques de régulation doivent donc prendre en compte ces nouveaux résultats pour mieux protéger la population.	L'incertitude liée aux estimations de l'exposition peut conduire à une sous-estimation du risque réel, ce qui nécessite des ajustements pour corriger ces biais. De plus, les études existantes ne prennent pas toujours en compte les facteurs de confusion tels que le tabagisme de manière uniforme.	1,64
25	A retrospective mortality study of workers exposed to radon in a Brazilian underground coal mine	Leine H. S. Veiga, Eliana C. S. Amaral, Didier Collin, Sérgio Koifman	2006	Article de recherche	Travailleurs d'une mine de charbon souterraine au Brésil	Radon	Évaluer la mortalité associée à l'exposition au radon parmi les mineurs de charbon au Brésil	L'étude a révélé un <u>SMR significativement élevé pour la mortalité par cancer du poumon</u> chez les mineurs souterrains, indiquant une <u>forte association avec l'exposition au radon</u> .	Biais potentiels dû à l'absence de quantification de l'exposition cumulative au radon et à l'effet du travailleur en bonne santé	1,75
26	Lung Cancer Risk at Low Radon Exposure Rates in German Uranium Miners	M. Kreuzer, N. Fenske, M. Schnelzer, L. Walsh	2015	Article de recherche	25 766 mineurs d'uranium allemands embauchés en 1960 ou après	Radon Faibles doses	Déterminer le risque de cancer du poumon lié à l'exposition à de faibles niveaux de radon chez les mineurs d'uranium allemands.	L'étude a trouvé une association claire entre la <u>mortalité par cancer du poumon et l'exposition cumulative</u> au radon. Le risque relatif <u>excessif</u> par mois de niveau de travail (WLM) était de 0,013. Les résultats montrent une <u>augmentation significative</u> du risque de cancer du poumon après une exposition prolongée à de faibles taux de radon.	Bien que l'étude ait contrôlé les facteurs de confusion potentiels comme le tabagisme, l'incertitude dans l'évaluation de l'exposition et le risque résiduel lié au tabagisme ne peuvent être totalement écartés. De plus, la cohorte étudiée est relativement jeune, ce qui peut limiter l'observation des effets à long terme.	7,60
27	Risk of lung cancer from radon exposure: contribution of recently published studies of uranium miners	M. Trmarche, J. Harrison, D. Laurier, E. Blanchardon, F. Paquet, J. Marsh	2012	Article de recherche	Cohortes de mineurs d'uranium en République Tchèque, France, et Allemagne	Radon Faibles doses	Évaluer le risque de cancer du poumon associé à l'exposition au radon chez les mineurs d'uranium, en tenant compte des facteurs de modification tels que l'âge, le temps écoulé depuis l'exposition, et l'interaction avec le tabagisme.	L'étude conclut que l'exposition chronique au radon chez les mineurs d'uranium est associée à un <u>risque accru</u> de cancer du poumon. Le risque est particulièrement élevé pour les <u>expositions cumulées à faible dose</u> sur de longues périodes. L'analyse a également mis en évidence l'importance de la modélisation de l'âge au moment de l'exposition et du temps écoulé depuis l'exposition.	Les incertitudes liées à l'estimation des expositions passées, en particulier dans les premières années d'exploitation minière, ainsi que la variabilité des taux de mortalité par cancer du poumon dans les cohortes étudiées, peuvent affecter les estimations de risque. L'interaction entre l'exposition au radon et le tabagisme constitue également un facteur de confusion important.	1,26
28	Cancers and Environment: Impact of the Environment on the Development of Digestive Cancers	Enam Sobheng Gouffack	2015	Article scientifique	Population générale, avec un focus sur les individus exposés aux facteurs environnementaux liés aux cancers digestifs	Radon Rayonnements ionisants	Examiner l'impact des facteurs environnementaux, y compris le rayonnement ionisant et le radon, sur le développement des cancers digestifs.	L'étude souligne que les <u>facteurs environnementaux</u> , tels que le radon et les rayonnements ionisants, jouent un rôle <u>significatif dans le développement des cancers digestifs</u> . La prévention primaire, basée sur la réduction de l'exposition à ces facteurs, pourrait contribuer à diminuer l'incidence de ces cancers.	Les limites incluent une variabilité dans l'exposition individuelle aux différents facteurs de risque et le manque de données spécifiques sur les interactions entre ces facteurs et les polymorphismes génétiques.	0,00
29	Risques liés à l'exposition à la radioactivité naturelle	Dominique Laurier, Didier Gay	2015	Article scientifique	Population française exposée à la radioactivité naturelle, y compris le radon	Radon Rayonnements ionisants	Fournir un état des lieux des connaissances sur l'exposition aux rayonnements ionisants d'origine naturelle et les risques associés, avec un focus particulier sur le radon.	La radioactivité naturelle est la première source d'exposition aux rayonnements ionisants pour la population française, avec un <u>risque démontré de cancer du poumon</u> associé à l'inhalation de radon, qui est le deuxième facteur de risque après le tabac.	Les limites des études incluent des estimations d'exposition imprécises, une faible puissance statistique et l'absence de données sur le risque de cancer pour d'autres expositions naturelles aux rayonnements.	0,13

30	LEUKEMIA, LYMPHOMA AND MULTIPLE MYELOMA MORTALITY (1950-1999) AND INCIDENCE (1969-1999) IN THE ELDOORADO URANIUM WORKERS' COHORT	Lydia B. Zablotska; Rachel S.D. Lane; Stanley E. Frost; Patsy A. Thompson	2014	Article de recherche	Travailleurs des mines et des usines d'uranium d'Eldorado, employés entre 1932 et 1980	Radon Rayonnements ionisants	Analyser les risques de cancers hématoLOGIQUES liés aux radiations dans la cohorte des travailleurs de l'uranium d'Eldorado	Aucune association statistiquement significative entre l'exposition aux produits de désintégration du radon (RDP) ou aux doses de rayons gamma et la mortalité ou l'incidence de tout type de cancer hématoLOGIQUE n'a été trouvée. Cependant, des augmentations non significatives statistiquement des risques d'incidence de la leucémie lymphoïde chronique (LL) et du lymphome hodgkinien (HL) et de la mortalité due au lymphome non hodgkinien (NHL) avec des doses croissantes de rayons gamma ont été observées.	8,88	L'étude présente des limitations en raison de la faible puissance statistique, des faibles expositions aux RDP et aux doses de rayons gamma, ainsi que de la rareté des cancers hématoLOGIQUES. De plus, il existe des incertitudes concernant l'évaluation des expositions aux radiations, notamment en raison des erreurs de mesure de l'exposition et de l'absence de données sur l'exposition au radon résidentiel. Les effets d'autres cancérogènes présents dans le minerai et le rôle du tabagisme n'ont pas été clairement évalués.
31	Risque de cancer lié aux radiations ionisantes	Dominique Laurier; Catherine Hill	2013	Article scientifique	Population exposée aux rayonnements ionisants, y compris les survivants des bombardements atomiques, les travailleurs, les patients et la population générale exposée au radon	Radon Rayonnements ionisants Faibles doses	Mettre à jour les connaissances sur les risques de cancer associés aux rayonnements ionisants, avec un focus sur les nouvelles données épidémiologiques concernant les faibles doses et les expositions prolongées.	Les études montrent un risque accru de cancer, y compris pour des doses inférieures à 100 mSv, particulièrement en cas d'exposition chronique. Les risques sont confirmés pour divers types de cancers, et les résultats soutiennent les mesures de radioprotection actuellement en place.	0,13	Les biais incluent les limites des études épidémiologiques à faibles doses, la variabilité des pratiques d'exposition, et les difficultés liées à l'extrapolation des résultats obtenus chez des populations spécifiques (comme les survivants de Hiroshima) à la population générale exposée à des doses plus faibles.
32	The Epidemiology of Lung Cancer Following Radiation Exposure	Lydia B. Zablotska; David B. Richardson; Ashley Golden; Eliza Pasqual; Brian Smith; Estelle Raag; Paul A. Demers; Minh Do; Nora Fenske; Veronika Dreffner; Michaela Kreuzer; Jonathan Samet; Stephen Bertke; Katilin Kelly-Reif; Mary K. Schubauer-Berigan; Ladislav Tomasek; Charles Wiggins; Dominique Laurier; Julian Apostoaiei; Brian A. Thomas; Steven L. Simon; F. Owen Hoffman; John D. Boice Jr.; Lawrence T. Dauer; Sara C. Howard; Sarah S. Cohen; Michael T. Mumma; Elizabeth D. Ellis; Keith F. Eckerman; Rich W. Leggett; David J. Pawel	2023	Article scientifique	Populations de mineurs d'uranium exposés à des radiations ionisantes, y compris en Amérique du Nord et en Europe	Radon, rayonnements ionisants	Étudier les associations entre l'exposition au radon et la mortalité par cancer du poumon dans des cohortes de mineurs d'uranium	L'étude confirme une relation linéaire entre l'exposition cumulative au radon et la mortalité par cancer du poumon, avec une augmentation significative du risque. Le risque est modulé par l'âge au moment de l'exposition et le temps écoulé depuis l'exposition.	2,47	Biais potentiels liés à l'hétérogénéité des cohortes, aux différences dans les mesures d'exposition, et à l'absence d'ajustement pour d'autres facteurs de risque comme le tabagisme.
33	Association between exposures to radon and γ-ray radiation and histologic type of lung cancer in Eldorado uranium mining and milling workers from Canada	Lydia B. Zablotska; Rachel S. D. Lane; Kristi Randhawa	2022	Article scientifique	Travailleurs des mines et usines d'uranium d'Eldorado au Canada, employés entre 1932 et 1980	Radon, rayonnements ionisants	Évaluer l'association entre l'exposition aux produits de désintégration du radon et les types histologiques de cancer du poumon chez les travailleurs des mines et usines d'uranium d'Eldorado	Les résultats montrent une augmentation significative de l'incidence du cancer du poumon chez les travailleurs par rapport à la population générale canadienne. Les risques de cancer du poumon augmentent avec l'exposition au radon pour tous les types histologiques, sans différence significative entre les types. L'ajout des doses de rayons γ au modèle n'a pas modifié les estimations de risque.	4,79	Les biais incluent l'absence de données sur le tabagisme, la présence d'autres cancérogènes potentiels tels que l'arsenic, et des erreurs potentielles de mesure de l'exposition.
34	Le radon au Québec : évaluation du risque à la santé et analyse critique des stratégies d'intervention	Jean-Claude Dessau; Fabien Gagnon; Benoit Lévesque; Claude Prévost; Jean-Marc Leclerc; Jean-Claude Belles-Isles	2004	Rapport	Population québécoise exposée au radon résidentiel	Radon, rayonnements ionisants	Évaluer le risque pour la santé associé au radon résidentiel au Québec et analyser de manière critique les stratégies d'intervention possibles.	L'exposition au radon dans les habitations au Québec est un problème de santé publique important, responsable d'environ 10 % des décès par cancer du poumon dans la province. Des stratégies d'intervention sont recommandées pour réduire l'exposition, y compris des mesures préventives dans la construction et des campagnes de dépistage.	X	Les incertitudes dans les estimations de la concentration de radon dans les résidences, les limites des modèles de risque utilisés, et la variabilité des réponses individuelles au radon.

35	Central nervous system tumours and occupational ionising radiation exposure: a nested case-control study among the ORICAMS cohort of healthcare workers in France	Julie Lopes; Clémence Baudin; Frédéric Rousseau; Hervé Roy; Philippe Lestaevel; Sylvaine Casir-Longo; Lynda Berasfa-Colas; Kierri Leuraud; Marie-Odile Bernier	2024	Article scientifique	Travailleurs de la santé professionnelle aux rayonnements ionisants	Étudier l'association entre l'exposition professionnelle aux rayonnements ionisants et la mortalité par tumeurs du système nerveux central (SNC) chez les travailleurs de la santé.	L'étude n'a trouvé aucune association statistiquement significative entre l'exposition cumulative aux rayonnements ionisants et la mortalité par tumeurs du SNC. Les limitations incluent une faible puissance statistique et une durée de suivi limitée.	Les biais incluent la courte durée de suivi, la faible puissance statistique et l'absence de données sur certains facteurs de risque potentiels.	2,97
36	Incidence risk of hepatobiliary malignant neoplasms in the cohort of workers chronically exposed to ionizing radiation	Galina Zhuravova; Maria Bamikova; Tamara Atzova	2024	Article scientifique	Travailleurs exposés chroniquement aux rayonnements ionisants dans la première installation de production nucléaire russe, l'association de production Mayak	Mettre à jour les estimations du risque de tumeurs malignes hépatobiliaires (HBMN) chez les travailleurs exposés chroniquement à des rayonnements ionisants externes (gamma) et internes (particules alpha)	L'étude montre une association significative positive entre le risque de malignité hépatique (tous types histologiques confondus) et la dose absorbée d'alpha, tandis qu'aucune association n'a été trouvée avec les rayons gamma externes. Les sarcomes hépatiques (AS) sont principalement associés à des expositions internes élevées aux particules alpha.	Les biais incluent des incertitudes dans l'évaluation des doses d'exposition, la variabilité des doses internes non mesurées, et la limitation de la portée de la surveillance dosimétrique interne.	4,44
37	Ionising radiation and solid cancer mortality among United States nuclear facility workers	Kaitlin Kelly-Reif; Steven Bentks; Robert D Daniels; David B Richardson; Mary K Schubauer-Berigan	2023	Article de recherche	Travailleurs des installations nucléaires aux États-Unis (cohorte de 101 363 travailleurs)	Évaluer l'association entre l'exposition aux rayonnements ionisants percutanés et la mortalité par cancer solide	Association positive observée entre l'exposition aux rayonnements ionisants et certains types de cancers solides, notamment le cancer du poumon	Biais potentiels liés à la confusion, l'erreur de mesure et la précision des données	6,12
38	Risk of cataract in health care workers exposed to ionizing radiation: a systematic review	Elena Della Vecchia; Alberto Modenesi; Tom Loney; Martina Muscatello; Mariela Silva Paulo; Giorgia Rossi; Fabriziomaria Gobba	2020	Revue systématique	21 études épidémiologiques sur le risque de cataracte chez les travailleurs de la santé exposés aux rayonnements ionisants	Examiner les preuves récentes sur le risque de cataracte chez les travailleurs de la santé exposés aux rayonnements ionisants	Toutes les études ont rapporté une prévalence accrue de cataractes, en particulier de cataractes sous-capsulaires postérieures, avec un risque plus élevé chez le personnel de cardiologie interventionnelle. Une relation dose-réponse a été observée	Biais potentiels liés à l'évaluation rétrospective des expositions, à la variabilité des méthodes de diagnostic, des caractères et aux facteurs de confusion tels que l'âge et les antécédents médicaux	2,36
39	Occupational Radiation Exposure and Thyroid Cancer Incidence in a Cohort of U.S. Radiologic Technologists, 1983–2013	Cari M. Kitahara; Dale L. Preston; Gita Neta; Mark P. Little; Michele M. Doody; Steven L. Simon; Alice J. Sigurdson; Bruce H. Alexander; Martha S. Linet	2018	Article de recherche	89 897 techniciens radiologiques américains ayant complété au moins deux questionnaires entre 1983 et 2013	Évaluer l'incidence du cancer de la thyroïde en relation avec l'exposition professionnelle cumulative aux rayonnements ionisants chez les techniciens radiologiques américains.	L'étude n'a trouvé aucune association entre l'exposition cumulative aux rayonnements ionisants et l'incidence du cancer de la thyroïde après ajustement pour plusieurs facteurs de risque. Les résultats sont cohérents avec d'autres études montrant une absence de lien significatif entre l'exposition aux faibles doses de radiation à l'âge adulte et le cancer de la thyroïde.	La faible puissance statistique due au nombre limité de cas de cancer de la thyroïde, la dépendance aux données auto-déclarées pour les années avant 1960, et l'absence de données sur la taille des tumeurs ou leur stade, ce qui aurait permis de mieux différencier les cancers thyroïdiens incidents des cancers plus pertinents sur le plan étiologique.	6,16
40	In utero exposure to radiation and haematological malignancies: pooled analysis of Southern Urals cohorts	Joachim Schüz; Isabelle Deltour; Lyudmila Y. Krestinina; Yulia V. Tsareva; Evgenia I. Tolstykh; Mikhail E. Sokolnikov; Alexander V. Akleyev	2017	Article scientifique	Enfants nés de mères travaillant à l'usine de Mayak ou vivant le long de la rivière Techa dans l'Oural du Sud, Russie	Analyser l'association entre l'exposition in utero aux rayonnements ionisants et le risque de cancers hématologiques, en utilisant des données combinées de deux cohortes	L'étude a trouvé une augmentation du risque de malignités hématologiques avec l'exposition in utero à des doses de 80 mGy ou plus. Cependant, les résultats sont mitigés avec une association faible dans les analyses de mortalité, indiquant une incertitude dans les conclusions.	Les biais incluent la petite taille de l'échantillon, la difficulté d'estimer précisément les doses de radiation reçues in utero et l'incertitude due aux différences entre les cohortes analysées.	7,60
41	Evidence for a Teratogenic Risk in the Offspring of Health Personnel Exposed to Ionizing Radiation?	Avi Wiesell; Gabriela Stolz; Annette Queisser-Wäinendörfer	2016	Article de recherche	Personnel médical féminin en âge de procréer exposé aux rayonnements ionisants en Allemagne	Évaluer le risque de malformations congénitales (MC) chez les enfants de femmes travaillant dans des professions médicales et potentiellement exposées aux rayonnements ionisants.	L'étude a trouvé un risque accru de malformations congénitales chez les enfants de mères exposées aux rayonnements ionisants, avec 30 % des enfants étudiés présentant une MC, comparé à 6,2 % dans le groupe de comparaison. L'étude a confirmé les résultats exploratoires précédents et a suggéré la nécessité d'études plus approfondies.	Le taux de participation était inférieur aux attentes, ce qui pourrait introduire un biais de sélection. De plus, l'étude n'a pas permis d'analyser en détail les doses de radiation reçues par les mères, et des facteurs de confusion possibles, tels que l'exposition paternelle, n'ont pas été complètement pris en compte.	2,00
42	Workers on transformation of the shelter object of the Chernobyl nuclear power plant into an ecologically-safe system show qEEG abnormalities and cognitive dysfunction: A follow-up study	Konstantyn Logonovskiy; Iryna Perchuk; Donatella Marazziti	2016	Article de recherche	136 hommes travaillant sur la transformation de l'objet de confinement de la centrale nucléaire de Tchernobyl	Évaluer l'activité bioélectrique du cerveau et les fonctions cognitives des travailleurs avant et après leur travail sur le projet de transformation de l'objet de confinement de Tchernobyl en un système écologiquement sûr.	L'étude a révélé une augmentation des anomalies qEEG et des troubles cognitifs légers après l'exposition des travailleurs aux rayonnements ionisants. Les résultats suggèrent que les changements observés peuvent être considérés comme des symptômes cognitifs d'un syndrome de fatigue chronique dû à l'exposition aux rayonnements.	Petite taille de l'échantillon, manque de données sur les facteurs de confusion tels que le tabagisme et la consommation d'alcool, et difficultés à généraliser les résultats à d'autres populations.	3,77

43	Eye Lens Opacities Among Physicians Occupationally Exposed to Ionizing Radiation	Anssi Auvinen; Tero Kiveli; Sirpa Heinävaara; Samy Mrena	2015	Article de recherche	Médecins finlandais âgés de 45 à 74 ans, exposés professionnellement aux rayonnements ionisants	Rayonnements ionisants	Comparer la fréquence des opacités du cristallin chez les médecins exposés professionnellement aux rayonnements ionisants par rapport à un groupe non exposé, et évaluer la relation dose-réponse entre la dose cumulée et les opacités.	L'étude n'a pas montré d'augmentation significative de la fréquence des opacités du cristallin chez les médecins exposés par rapport à ceux non exposés. Aucune relation dose-réponse n'a été observée, bien que les doses cumulées reçues par les sujets soient relativement faibles, ce qui n'exclut pas de petits accroissements des opacités.	La petite taille de l'échantillon limite la précision des résultats. Le faible niveau d'exposition réduit également la puissance statistique pour détecter une augmentation dose-dépendante des opacités du cristallin.	2,24
44	Occupational ionising radiation and risk of basal cell carcinoma in US radiologic technologists (1983-2005)	Terrence Lee; Alice J. Sigurdson; Dale L. Preston; Elisabeth K. Calton; D. Michal Freedman; Steven L. Simon; Kenrad Nelson; Genevieve Mataoski; Cari M. Kitahara; Jason J. Liu; Timothy Wang; Bruce H. Alexander; Michele M. Doady; Martha S. Linet; Mark P. Little	2015	Article scientifique	Techniciens en radiologie caucasiens aux États-Unis	Rayonnements ionisants	Déterminer le risque de carcinome basocellulaire (BCC) lié à l'exposition cumulée à des faibles doses de rayonnements ionisants	Aucune augmentation significative du risque de carcinome basocellulaire n'a été observée pour l'exposition cumulative à vie, mais un excès de risque a été trouvé pour les doses reçues avant 1960 et avant l'âge de 30 ans	Biais possibles dus aux incertitudes dans la dosimétrie, la sensibilité aux spécifications du modèle, et l'exclusion des techniciens ayant déclaré un BCC avant l'étude	4,20
45	Risk of cancer from occupational exposure to ionising radiation: retrospective cohort study of workers in France, the United Kingdom, and the United States (INWORKS)	David B Richardson; Elisabeth Cardis; Robert D Daniels; Michael Gillies; Jacqueline A. O'Hagan; Ghasan B Hamra; Richard Haylock; Dominique Laurier; Kiervi Leuraud; Monika Moissonnier; Mary K Schubauber-Berigan; Isabelle Thierry-Chef; Ausrele Kesminiene	2015	Étude de cohorte rétrospective	Travailleurs de l'industrie nucléaire en France, au Royaume-Uni et aux États-Unis	Rayonnements ionisants	Évaluer le risque de cancer associé à l'exposition professionnelle à des faibles et prolongées de rayonnements ionisants	L'étude a montré une augmentation linéaire du taux de cancer avec l'exposition accrue aux rayonnements ionisants, similaire aux résultats des survivants de la bombe atomique japonaise. Le taux de mortalité par cancer, à l'exclusion de la leucémie, a augmenté de 48% par Gy de dose cumulative.	Biais potentiels liés à la mesure des doses, les expositions non enregistrées, les erreurs de dosimétrie historique, et les expositions confondantes telles que l'amiante et le tabagisme.	6,62
46	Kidney cancer mortality and ionizing radiation among French and German uranium miners	Damien Drubay; Sophie Ancelet; Alain Adker; Michaela Kreuzer; Dominique Laurier; Estelle Rage	2014	Article de recherche	Mineurs d'uranium français et allemands	Rayonnements ionisants	Examiner la mortalité due au cancer du rein chez les mineurs d'uranium en relation avec l'exposition professionnelle aux radiations ionisantes.	Aucune association significative entre la mortalité par cancer du rein et l'exposition aux rayonnements ionisants n'a été observée dans les cohortes de mineurs français et allemands.	Biais potentiels liés à l'effet du travailleur en bonne santé, à l'absence d'exposition après la mort et à la classification des causes de décès inconnues.	1,75
47	Radiation and the Risk of Chronic Lymphocytic and Other Leukemias among Chernobyl Cleanup Workers	Lydia B. Zabionska; Dimitry Baz'Wa; Jay H. Lubin; Nataliya Gudzenko; Mark P. Little; Maureen Hatch; Stuart Frich; Irina Dyagil; Robert F. Reiss; Vadim V. Chumak; Andre Bouville; Vladimir Drosdovitch; Victor P. Kryuchkov; Ivan Golovanov; Elena Bakhanova; Nataliya Babkina; Tatiana Lubarets; Volodymyr Bebeshtko; Anatoly Romanenko; Kiyohiko Mabuchi	2013	Étude de cohorte emboîtée	Travailleurs ukrainiens avant participé aux opérations de nettoyage après l'accident de la centrale nucléaire de Tchernobyl	Rayonnements ionisants	Estimer les risques relatifs de leucémie lymphoïde chronique (CLL) et d'autres types de leucémies associées à des expositions prolongées à de faibles doses de rayonnements ionisants	L'exposition aux faibles doses de rayonnement suite aux opérations de nettoyage post-Tchernobyl est associée à une augmentation significative du risque de leucémie, similaire aux estimations pour les survivants des bombes atomiques japonaises.	Risque de biais dû aux différences de qualité des entretiens, au recours à des entretiens par procuration, et à la variabilité des doses estimées par la méthode RADRUE.	6,46
48	Risk of leukaemia mortality from exposure to ionising radiation in US nuclear workers: a pooled case-control study	Robert D. Daniels; Stephen Bertke; Kathleen M. Waters; Mary K. Schubauber-Berigan	2013	Étude cas-témoins	105 245 travailleurs nucléaires aux États-Unis	Rayonnements ionisants	Suivre les études antérieures sur la leucémogénicité de l'exposition professionnelle aux rayonnements ionisants; en réalisant une analyse cas-témoins imbriquée sur la mortalité par leucémie.	Les résultats montrent une augmentation positive mais imprécise du risque de leucémie pour les leucémies myéloïdes, mais pas pour la leucémie lymphoïde chronique (LLC). Les modèles temporels ont révélé que les risques de leucémie non-LLC étaient associés aux expositions survenues 6 à 14 ans avant l'âge atteint des cas.	Biais potentiels liés à l'atténuation du risque dans les régions de faible dose (<10 mGy) et de haute dose (>100 mGy), ainsi qu'à la variabilité des réponses selon le sous-type de leucémie. De plus, l'effet de la confusion des expositions professionnelles et des erreurs de mesure d'exposition pourrait également influencer les estimations du risque.	4,20

49	Non-Hodgkin lymphoma and occupational radiation exposure assessed using local data	Ken K. Karipidis; Geza Benke; Malcolm R. Sim; Lin Fritschi; Claire Vajdic; Anne Kricker; Bruce Armstrong	2009	Rapport court	694 cas de lymphome non hodgkinien et 694 contrôles en Australie, résidant dans le sud-est de l'Australie	Rayonnements ionisants	Déterminer si l'exposition professionnelle aux rayonnements ionisants et le lymphome non hodgkinien, confirmant les résultats antérieurs utilisant une matrice d'exposition professionnelle finlandaise (FINIEM). Les rapports de cotes (OR) étaient proches de 1, suggérant aucune augmentation significative du risque.	L'étude n'a trouvé aucune preuve d'une association entre l'exposition professionnelle aux rayonnements ionisants et le lymphome non hodgkinien, confirmant les résultats antérieurs utilisant une matrice d'exposition professionnelle finlandaise (FINIEM). Les rapports de cotes (OR) étaient proches de 1, suggérant aucune augmentation significative du risque.	Possibilité de classification erronée des expositions en raison de l'utilisation de sujets exposés, limitant la puissance statistique.	3,13
50	Thyroid adenomas and carcinomas following radiotherapy for a hemangioma during infancy	Nadia Haddy; Tianarimama Andriamboavonjy; Catherine Paoletti; Marie-Gabrielle Dondon; Abdeldahir Mousannif; Akhtar Shamsaldin; Françoise Doyon; Martine Labbé; Caroline Robert; Marie-Françoise Avri; Philippe Fragu; François Schwage; Jean Chavaudra; Claire Eschwege; Dimitri Lefkopoulos; Martin Schlumberger; Ibrahim Diallo; Florent de Vathaire	2009	Article de recherche	4 767 patients traités pour un hémangiome cutané durant l'enfance entre 1940 et 1973 à l'Institut Gustave-Roussy	Rayonnements ionisants	Évaluer l'incidence des adénomes et carcinomes thyroïdiens différenciés après radiothérapie pour un hémangiome chez des patients traités pendant l'enfance.	L'étude a trouvé une relation dose-réponse significative entre la dose de rayonnement reçue par la thyroïde et le risque de cancer de la thyroïde (ERR/Gy : 14,7) et d'adénome (ERR/Gy : 5,7). Les patients traités avec la radiothérapie externe ou le Baudum 226 ont montré un risque plus élevé de développer un cancer de la thyroïde.	Incertitude dans les estimations de dose, possible biais de sélection dû à la perte de suivi de certains patients, et potentielle intensification du suivi médical chez les patients traités pouvant conduire à une détection accrue des tumeurs.	4,72
51	Thyroid examination in highly radiation-exposed workers after the Chernobyl accident	Bernhard O. Boehm; Marianna Steinert; Johannes W. Dietrich; Raif U. Peter; David Bely; Gerald Wagemaker; Silke Rosinger; Theodor M. Fiedner; Melanie Weiss	2009	Article scientifique	Travailleurs du réacteur de Tchernobyl exposés à de fortes doses de radiations après l'accident	Rayonnements ionisants	Examiner l'impact de l'exposition à des doses élevées de radiations, y compris l'iode radioactif, sur la thyroïde des travailleurs fortement exposés après l'accident de Tchernobyl	L'étude a montré peu d'impact clinique sur la thyroïde dans cette cohorte fortement exposée, avec seulement quelques cas de goitre et de niveaux élevés d'anticorps thyroïdiens auto-immuns. Aucun cancer de la thyroïde cliniquement manifeste n'a été observé.	Les biais incluent l'absence de groupe de contrôle, la petite taille de l'échantillon, et l'absence de biopsies à l'aiguille fine pour confirmer l'absence de cancer.	5,11
52	Ionizing radiation exposure and cancer risk among Norwegian nurses	Jenny-Anne S. Lie; Kristina Kjaerheim; Tore Tynes	2008	Article de recherche	43 316 infirmières norvégiennes diplômées entre 1914 et 1984	Rayonnements ionisants	Évaluer l'influence de l'exposition professionnelle potentielle aux rayonnements ionisants sur le risque de cancers chez les infirmières norvégiennes.	Aucun lien clair entre l'exposition aux rayonnements ionisants et les cancers étudiés (sein, thyroïde, ovaire, leucémie, mélanome malin, autres cancers de la peau). Augmentation du risque de cancer du poumon observée, probablement due au tabagisme.	L'absence d'estimations précises des doses de radiation individuelles et la classification erronée non différencielle des expositions.	2,20
53	Medical exposure to ionizing radiation and the risk of brain tumours: Interphone study group, Germany	Marja Blettner; Brigitte Schleichner; Florence Samkange-Zeeb; Gabriele Berg; Klaus Schaefer; Joachim Schüz	2007	Article scientifique	Participants de l'étude Interphone en Allemagne, âgés de 30 à 59 ans	Rayonnements ionisants	Étudier l'association entre l'exposition médicale ou professionnelle aux rayonnements ionisants et le risque de tumeurs cérébrales	Aucun risque significatif accru de tumeurs cérébrales n'a été trouvé pour l'exposition aux rayonnements ionisants. Un risque accru non significatif a été observé pour les méningiomes et les névromes acoustiques après radiothérapie.	Les biais potentiels incluent le biais de rappel dû à la collecte de données auto-déclarées, la variabilité des doses de rayonnement, et la limitation de l'exactitude des estimations d'exposition.	6,15
54	Occupational exposure to ionizing and non-ionizing radiation and risk of glioma	Ken K. Karipidis; Geza Benke; Malcolm R. Sim; Timo Kauppinen; Graham Giles	2007	Étude cas-témoins	414 cas de gliome et 421 témoins	Rayonnements ionisants	Examiner les associations possibles entre l'exposition professionnelle aux rayonnements ionisants et non ionisants et le risque de gliome chez l'adulte.	Aucune preuve d'association entre le gliome et l'exposition professionnelle aux rayonnements ionisants et non ionisants. Une association possible avec les rayonnements UV chez les hommes a été observée, mais pourrait être due à des facteurs de confusion.	Biais potentiels liés à la classification des expositions professionnelles et à l'utilisation de méthodes d'auto-évaluation et d'expertise.	3,13
55	Occupational exposure to ionizing and non-ionizing radiation and risk of non-Hodgkin lymphoma	Ken K. Karipidis; Geza Benke; Malcolm R. Sim; Timo Kauppinen; Anne Kricker; Ann Marie Hughes; Andrew E. Grulich; Claire M. Vajdic; John Mialdor; Bruce Armstrong; Lin Fritschi	2007	Article de recherche	694 cas de lymphome non hodgkinien et 694 contrôles en Australie, résidant dans le sud-est de l'Australie	Rayonnements ionisants	Étudier l'association entre l'exposition professionnelle aux rayonnements ionisants et non ionisants (UV, RF, ELF) et le risque de développer un lymphome non hodgkinien (NHL).	L'étude n'a pas trouvé de preuve solide d'une association entre l'exposition aux rayonnements ionisants ou ELF et le lymphome non hodgkinien. Une légère association positive a été observée pour l'exposition aux rayonnements UV, avec une augmentation du risque dans les groupes les plus exposés.	Possibilité de biais de classification de l'exposition, en raison de l'utilisation de matrices d'exposition professionnelle (FINIEM) développées dans un autre pays (Finlande), pouvant ne pas refléter avec précision les conditions d'exposition en Australie.	3,22
56	Cancer incidence among physicians occupationally exposed to ionizing radiation in Finland	Pirkko Jartti; Eero Pukkala; Jukka Uitti; Anssi Auvinen	2006	Article de recherche	1 312 médecins en Finlande exposés professionnellement aux rayonnements ionisants, comparés à 15 281 médecins non exposés.	Rayonnements ionisants	Évaluer l'incidence du cancer chez les médecins finlandais exposés aux rayonnements ionisants et comparer cette incidence à celle des médecins non exposés.	L'étude a montré que l'exposition professionnelle aux rayonnements médicaux n'est pas un facteur de risque majeur pour le cancer chez les médecins. Un risque légèrement accru de cancer du sein chez les femmes exposées a été observé.	Manque d'informations sur les doses en dessous du seuil d'enregistrement, absence de données d'exposition avant 1970, et faible nombre de cas limitant la capacité à estimer une réponse dose-réponse.	5,03

57	Lung cancer mortality among workers at a nuclear materials fabrication plant	David B. Richardson, Steve Wing	2006	Article scientifique	Travailleurs de l'usine de fabrication de matériaux nucléaires Y-12 à Oak Ridge, Tennessee	Rayonnements ionisants	Étudier l'association entre l'exposition aux rayonnements ionisants et la mortalité par cancer du poumon chez les travailleurs de l'usine Y-12	L'étude montre une association positive entre la dose cumulée de rayonnements externes et la mortalité par cancer du poumon, en particulier pour les doses reçues entre 5 et 14 ans après l'exposition. Cependant, l'association n'est pas linéaire pour les doses internes. L'étude a révélé que les associations entre les radiations et la mortalité par cancer sont principalement liées aux doses reçues à des âges plus avancés, avec une forte association avec le cancer du poumon. Les doses cumulées reçues après 55 ans montrent un risque relatif excessif par Sievert (ERR/Sv) de 3,4 pour tous les cancers et de 9,05 pour le cancer du poumon.	Les biais incluent des incertitudes dans l'estimation des doses externes et internes, l'absence de données sur l'exposition à d'autres cancérogènes pulmonaires, et la puissance statistique limitée de l'étude.	3,08
58	Age at exposure to ionizing radiation and cancer mortality among Hanford workers: follow up through 1994	S Wing, D B Richardson	2005	Article de recherche	26 389 travailleurs embauchés entre 1944 et 1978 à l'usine de production de plutonium de Hanford	Rayonnements ionisants	Évaluer l'influence de l'âge à l'exposition sur les estimations du risque de cancer chez les travailleurs de Hanford.	L'étude a révélé que les associations entre les radiations et la mortalité par cancer sont principalement liées aux doses reçues à des âges plus avancés, avec une forte association avec le cancer du poumon. Les doses cumulées reçues après 55 ans montrent un risque relatif excessif par Sievert (ERR/Sv) de 3,4 pour tous les cancers et de 9,05 pour le cancer du poumon.	Incertaines sur les doses reçues, en particulier pour les premières années d'exploitation, et potentiel de confusion avec d'autres facteurs de risque, comme le tabagisme, en particulier pour les doses reçues à des âges plus avancés.	4,20
59	Non-melanoma skin cancer in relation to ionizing radiation exposure among U.S. radiologic technologists	Shinji Yoshinaga, Michael Hauptmann, Alice J. Sigurdson, Michele Morn Doody, D. Michael Freedman, Bruce H. Alexander, Martha S. Linet, Elaine Ron, Kyohiko Mabuchi	2005	Article de recherche	65,304 techniciens en radiologie américains blancs	Rayonnements ionisants	Évaluer le risque de cancer de la peau non mélanome en relation avec l'exposition professionnelle aux rayonnements ionisants chez les techniciens en radiologie américains.	Le risque de carcinome basocellulaire (BCC) était plus élevé chez ceux ayant commencé à travailler avant 1950, particulièrement avant 1940, avec un risque modifié par les caractéristiques de pigmentation. Aucune association n'a été trouvée pour le carcinome épidermoïde (SCC).	Les biais incluent des estimations approximatives de l'exposition aux rayonnements ionisants et l'utilisation de diagnostics auto-déclarés non confirmés pour une partie des cas de cancer de la peau.	6,16
60	Occupational Exposure to Ionizing Radiation is Associated with Autoimmune Thyroid Disease	Henry Völske, André Werner, Henri Wallaschofski, Nela Friedrich, Daniel M. Robinson, Stefan Kindler, Matthias Kraft, Ulrich John, Wolfgang Hoffmann	2005	Article de recherche	4 299 participants d'une étude en Pomerania, Allemagne	Rayonnements ionisants	Examiner l'association entre l'exposition professionnelle aux rayonnements ionisants et les maladies thyroïdiennes auto-immunes (AITD)	Une exposition professionnelle aux rayonnements ionisants est associée à un risque accru d'AITD chez les hommes, avec un effet dose-réponse observé. Chez les femmes, une association est suggérée mais les données sont moins claires.	Biais potentiels en raison de l'absence de mesures précises de l'exposition aux radiations individuelles et des estimations approximatives basées sur l'exposition professionnelle signalée.	5,00
61	Prevalence of thyroid nodules in an occupationally radiation exposed group: a cross-sectional study in an area with mild iodine deficiency	Paolo Trecroli, Anna Ciampolillo, Giuseppe Marinelli, Riccardo Giorgio, Gabriella Serio	2005	Article de recherche	304 travailleurs exposés aux rayonnements dans un hôpital de Bari, Italie, et 419 travailleurs non exposés comme groupe de contrôle	Rayonnements ionisants	Évaluer la prévalence des nodules thyroïdiens dans un groupe de travailleurs hospitaliers exposés aux rayonnements dans une région avec une carence légère en iode.	L'étude n'a pas trouvé de risque accru de développer des nodules thyroïdiens dans le groupe exposé. Les nodules thyroïdiens étaient plus fréquents dans le groupe non exposé, ce qui pourrait s'expliquer par une plus grande prédisposition familiale aux maladies thyroïdiennes dans ce groupe.	Biais de sélection possible dû à une plus grande participation des personnes conscientes des problèmes de thyroïde dans le groupe non exposé. La carence légère en iode dans la région pourrait également avoir influencé les résultats.	4,49
62	Nested Case-Control Study of External Ionizing Radiation Dose and Mortality From Dementia Within a Pooled Cohort of Female Nuclear Weapons Workers	Ralph F. Sibley, Beth S. Moscato, Gregg S. Wilkinson, Nachimuthu Natarajan	2003	Article de recherche	67 976 femmes ayant travaillé dans des usines d'armes nucléaires aux États-Unis	Rayonnements ionisants	Estimer l'effet des expositions professionnelles aux rayonnements ionisants et à d'autres dangers sur la mortalité due à la démence.	L'étude a montré que les doses maximales annuelles et les doses cumulées de rayonnements ionisants étaient associées à un risque accru de décès par démence. Les tendances dose-réponse étaient significatives pour les deux types d'exposition. Cependant, le nombre de cas était faible, ce qui justifie la répétition de l'étude avec un échantillon plus large.	Le faible nombre de cas, la dépendance aux certificats de décès pour diagnostiquer la démence, et la possibilité que certains travailleurs non surveillés aient reçu des doses non négligeables de rayonnement.	3,08
63	Fetal death and congenital malformation in babies born to nuclear industry employees: report from the nuclear industry family study	Pat Doyle, Noreen Macconochie, Eve Roman, Graham Davies, Peter G Smith, Valerie Beral	2000	Article scientifique	Employés du secteur nucléaire au Royaume-Uni et leurs enfants	Rayonnements ionisants	Évaluer l'impact de l'exposition professionnelle aux rayonnements ionisants sur les issues reproductives, telles que les morts fœtales et les malformations congénitales	L'étude n'a pas trouvé de lien entre l'exposition professionnelle des pères aux rayonnements et les risques de décès fœtal ou de malformations. Chez les mères, un risque accru de fausse couche précoce a été observé si elles avaient été surveillées avant la conception, mais sans relation claire avec la dose.	Des biais potentiels incluent des incertitudes dans les données de surveillance, l'auto-déclaration des résultats reproductifs, et la variabilité des doses de rayonnement.	21,54
64	Overview of epidemiological studies of nuclear workers: opportunities, expectations, and limitations	Richard Wakeford	2021	Article de recherche	Travailleurs dans les installations nucléaires en Europe occidentale et en Amérique du Nord	Rayonnements ionisants Faibles doses	Examiner les études épidémiologiques sur les travailleurs nucléaires pour évaluer les risques de cancer liés aux expositions prolongées à des faibles doses de rayonnements ionisants, et identifier les opportunités d'amélioration et les limitations des études actuelles.	L'étude souligne que les travailleurs exposés aux rayonnements ionisants à faible dose sur de longues périodes montrent des risques accrus de leucémie et de cancers solides. Cependant, des différences dans les estimations de risques entre les cohortes de travailleurs étudiées, telles que INWORKS et Mayak, suggèrent des incertitudes dans les données de dose, en particulier pour les périodes de travail antérieures à 1960. Une surveillance accrue et une analyse plus approfondie des incertitudes de dosage sont nécessaires.	Incertitudes liées aux doses de rayonnements reçues par les travailleurs, en particulier pendant les premières années d'exploitation des installations nucléaires. Biais potentiels dus à des doses manquantes ou sous-estimées, ce qui peut affecter la précision des estimations de risque.	1,26

65	Cohort profile: ORICAMs, a French cohort of medical workers exposed to low-dose ionizing radiation	Julie Lopes; Clémence Baudin; Juliette Feuadent; Hervé Roy; Sylvaine Caër-Lorho; Klervi Leuraud; Marie-Odile Bernier	2023	Article de recherche	Travailleurs médicaux en France exposés aux rayonnements ionisants à faible dose	Rayonnements ionisants Faibles doses	Étudier les risques de mortalité par cancer et autres maladies non cancéreuses chez le personnel médical exposé aux rayonnements ionisants dans le cadre de leur activité professionnelle.	La mortalité chez les travailleurs exposés aux rayonnements médicaux est significativement inférieure aux taux de référence nationaux, bien que cet effet puisse être biaisé par l'effet du travailleur en bonne santé.	Effet du travailleur en bonne santé, courte durée de suivi; absence de données sur les facteurs de style de vie.	3,75
66	Cerebrovascular Disease Mortality after occupational Radiation Exposure among the UK National Registry for Radiation Workers Cohort	Catherine A. Hinksman; Richard G. E. Haylock; Michael Gillies	2022	Article de recherche	Travailleurs nucléaires britanniques inscrits au registre national des travailleurs exposés aux radiations	Rayonnements ionisants Faibles doses	Évaluer l'association entre l'exposition chronique à de faibles doses de radiations ionisantes et la mortalité par maladies cerebrovasculaires	L'étude suggère une association possible entre l'exposition à de faibles doses de rayonnements ionisants et un risque accru de mortalité par maladies cerebrovasculaires, mais avec une incertitude sur les estimations actuelles.	Biais potentiel lié à l'effet du survivant en bonne santé, manque de données sur les facteurs de risque confondants tels que l'hypertension, le tabagisme, et les estimations professionnelles antérieures.	3,19
67	Low-dose ionizing radiation and cancer mortality among enlisted men stationed on nuclear-powered submarines in the United States Navy	George Friedman-Jimenez; Ikuko Kato; Pam Factor-Litvak; Roy Shore	2022	Article de recherche	85 033 hommes enrôlés dans la marine américaine ayant servi sur des sous-marins nucléaires entre 1969 et 1982	Rayonnements ionisants Faibles doses	Évaluer la mortalité par cancer parmi les hommes enrôlés stationnés sur des sous-marins nucléaires; exposés à de faibles doses de rayonnements ionisants, et déterminer les relations dose-réponse au sein de la cohorte.	L'étude a révélé une mortalité par cancer compatible avec les excès de risques relatés dans d'autres études sur les faibles doses de rayonnements ionisants, bien que les intervalles de confiance soient larges. Les résultats suggèrent un risque excessif de cancers solides et de leucémies, en ligne avec les cohortes similaires, tout en tenant compte de la faible dose cumulative reçue par les sous-marinières.	L'étude est limitée par l'absence de données individuelles sur le tabagisme, ce qui pourrait confondre les résultats. De plus, les doses de rayonnement post-service dans d'autres industries ou en raison de soins médicaux ne sont pas prises en compte, ce qui pourrait affecter la relation dose-réponse observée.	2,47
68	Ionizing Radiation-Induced Circulatory and Metabolic Diseases	Soile Tapio; Mark P. Little; Jan Christian Kaiser; Nathalie Impens; Nobuyuki Hamada; Alexandros G. Georgakilas; David Simar; Sisko Salomaa	2021	Article de recherche	Personnes exposées à des doses faibles et modérées de rayonnements ionisants, y compris les survivants du cancer traités par radiothérapie	Rayonnements ionisants Faibles doses	Examiner les risques associés aux maladies circulatoires et métaboliques induites par les rayonnements ionisants dans divers contextes d'exposition, y compris l'exposition clinique, professionnelle et environnementale.	L'étude conclut que même les faibles doses de rayonnements ionisants peuvent avoir des effets délétères sur les systèmes circulatoire et métabolique, soulignant la nécessité de recherches supplémentaires pour mieux comprendre les mécanismes sous-jacents et les risques associés.	Les études disponibles présentent des hétérogénéités importantes, notamment en ce qui concerne les dosimétries organiques et les facteurs de risque confondants. De plus, les mécanismes sous-jacents aux effets des faibles doses sont encore mal compris, ce qui limite la généralisation des résultats.	10,30
69	Low- and moderate-dose non-cancer effects of ionizing radiation in directly exposed individuals, especially circulatory and ocular diseases: a review of the epidemiology	Mark P. Little; Tamara V. Atzova; Nobuyuki Hamada	2021	Article scientifique	Individus directement exposés à des doses faibles et modérées de radiations ionisantes, y compris les travailleurs du secteur nucléaire et les survivants des bombes atomiques	Rayonnements ionisants Faibles doses	Passer en revue les effets non cancéreux, en particulier les maladies circulatoires et oculaires, associés à une exposition à des doses faibles et modérées de radiations ionisantes	L'étude documente un risque excédentaire, statistiquement significatif pour les maladies circulatoires, notamment les cardiopathies ischémiques et les accidents vasculaires cérébraux, ainsi qu'un risque accru de cataractes sous-capsulaire postérieure à des doses inférieures à 0,5 Gy	Biais potentiels dus à l'hétérogénéité des risques relatifs excessifs par unité de dose dans les études épidémiologiques à faibles doses, ainsi qu'à la modification des effets par des facteurs de risque établis	2,47
70	Occupational radiation exposure and cancer incidence in a cohort of diagnostic medical radiation workers in South Korea	Won Jin Lee; Seulki Ko; Ye Jin Bang; Seung-Ah Choe; Yeongchull Choe; Dale L Preston	2021	Article scientifique	Travailleurs sud-coréens de la radiologie diagnostique	Rayonnements ionisants Faibles doses	Étudier l'association entre l'exposition professionnelle à de faibles doses de rayonnement ionisant et l'incidence du cancer parmi les travailleurs médicaux de la radiologie diagnostique en Corée du Sud	L'étude a trouvé une association positive, mais non significative, entre les doses de radiation et l'incidence du cancer, suggérant que des études supplémentaires avec un suivi prolongé sont nécessaires pour clarifier ces risques	Biais potentiels liés au court suivi, aux faibles doses cumulées de rayonnement, et à l'absence de données sur les facteurs de risque liés au mode de vie	4,20

71	Systematic Review and Meta-analysis of Circulatory Disease from Exposure to Low-Level Ionizing Radiation and Estimates of Potential Population Mortality Risks	2012	Revue systématique	Travailleurs de l'usine de Mayak, techniciens en radiologie aux États-Unis, survivants de la bombe atomique japonaise	Rayonnements ionisants Faibles doses	Résumer les informations sur les risques de maladies circulatoires associées à des expositions modérées et faibles aux rayonnements ionisants.	Il existe une association entre l'exposition aux rayonnements ionisants à faibles doses et un risque accru de maladies circulatoires. Les risques estimés pour les maladies circulatoires sont comparables aux risques estimés pour le cancer, ce qui pourrait doubler les estimations actuelles de mortalité liées aux rayonnements.	Hétérogénéité entre les études incluses, en particulier pour les points finaux non cardiaques. Possibilité de facteurs de confusion non contrôlés, notamment les facteurs liés au mode de vie chez certains groupes professionnels. Influence disproportionnée des groupes exposés à des doses plus élevées (> 0,5 Sv) sur les tendances observées.	6,46
72	Epidemiological Studies of Low-Dose Ionizing Radiation and Cancer: Summary Bias Assessment and Meta-Analysis	2020	Meta-analyse	26 études épidémiologiques sur les risques de cancer liés à l'exposition à de faibles doses de rayonnements ionisants	Rayonnements ionisants Faibles doses	Évaluer les risques de cancer associés à l'exposition à de faibles doses de rayonnements ionisants et la possibilité que ces risques soient biaisés	La majorité des études rapportent un risque relatif excessif (ERR) positif pour les cancers solides et la leucémie, même après l'exclusion des études potentiellement biaisées	Biais potentiels liés aux erreurs de dosimétrie, au confounding, à la sélection des participants et à la classification des résultats.	6,92
73	Outcome Assessment in Epidemiological Studies of Low-Dose Radiation Exposure and Cancer Risks: Sources, Level of Ascertainment, and Misclassification	2020	Revue de la littérature	26 études épidémiologiques sur les risques de cancer liés à l'exposition à de faibles doses de radiation	Rayonnements ionisants Faibles doses	Évaluer les sources d'erreurs et les biais possibles dans l'évaluation des résultats des études sur les faibles doses de radiations et les risques de cancer	La majorité des études n'ont pas fourni suffisamment d'informations pour évaluer tous les biais potentiels liés à l'évaluation des résultats, bien que les limitations rapportées suggèrent que ces biais ont généralement peu d'effet sur les estimations du risque ou ont biaisé les estimations vers la nullité dans la plupart des cas.	Biais liés à la perte de suivi, à la sous-déclaration ou à la sur-déclaration des résultats, et aux changements dans les systèmes de classification.	6,92
74	Risk of Leukemia Associated with Protracted Low-Dose Radiation Exposure: Updated Results from the National Registry for Radiation Workers Study	2019	Article de recherche	Travailleurs du secteur nucléaire au Royaume-Uni inscrits au registre national des travailleurs exposés aux radiations	Rayonnements ionisants Faibles doses	Évaluer le risque de leucémie associé à l'exposition prolongée à de faibles doses de radiation dans une cohorte de travailleurs au Royaume-Uni	Les résultats montrent une association significative entre l'exposition à long terme à de faibles doses de rayonnement et un risque accru de leucémies, en particulier pour la leucémie myéloïde chronique (LMC)	Biais liés à la classification des décès, à l'absence de prise en compte des expositions internes et à la variabilité des pratiques de dosimétrie	3,19
75	Risk of malignant skin neoplasms in a cohort of workers occupationally exposed to ionizing radiation at low dose rates	2018	Article de recherche	Travailleurs d'une installation de production nucléaire en Russie	Rayonnements ionisants Faibles doses	Évaluer les risques d'incidence du mélanome cutané (SM) et du cancer de la peau non mélanomateux (NMSC) chez les travailleurs exposés à des doses cumulées de rayonnement ionisant supérieures à 2,0 Sv. Aucun lien significatif n'a été trouvé pour les radiations ionisantes à faibles doses sur de longues périodes.	Le risque d'incidence de NMSC a été significativement augmenté chez les travailleurs exposés à des doses cumulées de rayonnement ionisant supérieures à 2,0 Sv. Aucun lien significatif n'a été trouvé pour l'incidence de SM avec les doses cumulées de rayonnement gamma externe.	Biais de sélection dû à l'exclusion des travailleurs avec des informations médicales manquantes; Biais d'information dû à l'absence de données de dose cutanée dans le système de dosimétrie des travailleurs de Mayak.	3,75

76	A restatement of the natural science evidence base concerning the health effects of low-level ionizing radiation	Angela R. McLean; Ella K. Adlen; Elisabeth Cardis; Alex Elliott; Dudley T. Goodhead; Mats Harms-Ringdahl; Jolyn H. Hendry; Peter Hoskin; Penny A. Jeggo; David J. C. Mackay; Colin R. Muirhead; John Shepherd; Roy E. Shore; Geraldine A. Thomas; Richard Wakeford; H. Charles J. Godfrey	2017	Revue scientifique	Population générale, travailleurs exposés à des radiations, et personnes affectées par des accidents nucléaires	Rayonnements ionisants Faibles doses	Fournir une synthèse des preuves scientifiques sur les effets des faibles doses de rayonnements ionisants sur la santé humaine, afin de servir de base de référence pour les non-spécialistes.	Les preuves scientifiques indiquent que les effets sur la santé des faibles doses de rayonnements ionisants sont difficiles à quantifier, mais il existe un consensus sur certains risques, notamment le risque accru de cancer.	4,50
77	Breast cancer risk and protracted low-to-moderate dose occupational radiation exposure in the US Radiologic Technologists Cohort, 1989–2008	D. L. Preston; C. M. Kitahara; D. M. Freedman; A. J. Sigurdson; S. L. Simon; M. P. Little; E. K. Cahoon; P. Rajaraman; J. S. Miller; B. H. Alexander; M. M. Doody; M. S. Linet	2016	Article scientifique	Technologies radiologiques américaines, certifiées entre 1926 et 1982	Rayonnements ionisants Faibles doses	Examiner les effets des expositions professionnelles prolongées à faibles doses de rayonnement sur le risque de cancer du sein chez les technologistes radiologiques	L'exposition prolongée à de faibles doses de rayonnement était associée à un risque accru de cancer du sein, en particulier chez les femmes nées avant 1930, qui avaient des doses moyennes annuelles plus élevées. Cependant, en raison des incertitudes et des erreurs systématiques possibles dans les estimations des doses avant 1960, ces résultats doivent être interprétés avec prudence.	7,60
78	A new era of low-dose radiation epidemiology	Carri M. Kitahara; Martha S. Linet; Preetha Rajaraman; Estelle Ntwe; Amy Berrington de Gonzalez	2015	Article scientifique	Populations exposées aux faibles doses de radiations ionisantes (diagnostic médical, environnement, travail)	Rayonnements ionisants Faibles doses	Étudier les risques de cancer et autres effets stochastiques liés à des expositions faibles aux radiations ionisantes, en mettant l'accent sur les nouvelles approches épidémiologiques	Biais potentiels liés aux erreurs dans l'estimation des doses, à l'hétérogénéité des expositions, et au manque d'ajustement pour des facteurs de confusion	8,26
79	General tissue reactions and implications for radiation protection	S. Miyazaki; C. Hill	2015	Article scientifique	Population exposée aux rayonnements ionisants, y compris les travailleurs dans les centrales nucléaires; les patients en radiothérapie, et les survivants d'accidents nucléaires	Rayonnements ionisants Faibles doses	Examiner les réactions tissulaires non cancéreuses dues à l'exposition aux rayonnements ionisants et discuter de leur implication pour la protection contre les radiations.	Les effets non cancéreux des rayonnements ionisants, tels que les maladies cardiovasculaires, présentent des risques qui nécessitent une meilleure caractérisation pour être inclus dans les systèmes de protection radiologique. La relation dose-réponse pour ces effets est souvent non linéaire et complexe.	1,26
80	Ionising radiation and risk of death from leukaemia and lymphoma in radiation-monitored workers (INWORKS): an international cohort study	Kiervi Leuraud; David B. Richardson; Elisabeth Cardis; Robert D. Daniels; Michael Gillies; Jacqueline A. O'Hagan; Ghassan B. Hamra; Richard Haylock; Dominique Laurier; Monika Moissonnier; Mary K. Schubauer-Berghal; Isabelle Thierry-Chef; Aurelie Kaszminiere	2015	Étude de cohorte internationale	308 297 travailleurs surveillés pour l'exposition aux rayonnements ionisants dans des installations nucléaires en France, au Royaume-Uni et aux États-Unis	Rayonnements ionisants Faibles doses	Quantifier les associations entre l'exposition prolongée à de faibles doses de rayonnements ionisants et la mortalité due à la leucémie et aux lymphomes chroniques	Biais potentiels liés à l'erreur de classification des expositions et des résultats, ainsi qu'à des facteurs de confusion socio-économiques	725,00
81	Risques professionnels liés aux rayonnements ionisants et surveillance des personnes exposées	Jean-Pierre Gérard	2015	Article scientifique	Personnes travaillant au contact des rayonnements ionisants, y compris dans le secteur médical, l'industrie nucléaire, les compagnies aériennes, et les secteurs militaires en France	Rayonnements ionisants Faibles doses	Examiner les risques professionnels liés aux rayonnements ionisants, en particulier les effets cancérogènes, et discuter des mesures de radioprotection pour assurer un environnement de travail sûr.	Les études épidémiologiques montrent que le risque de cancer ou de leucémie radio-induits est négligeable, sauf en cas de non-respect des mesures de radioprotection, comme chez les radiologues intermédiaires ou lors d'accidents graves (Tchernobyl, Fukushima).	0,13

82.	Occupational Radiation Exposure and Breast and Esophagus Cancer Risk among Medical Diagnostic X-Ray Workers in Jiangsu, China	Fu-Ru Wang; Qiao-Qiao Fang; Wei-Ming Tang; Xiao-San Xu; Tanmay Mahapatra; Sanchita Mahapatra; Yu-Fei Liu; Ning-Le Yu; Quan-Fu Sun	2015	Article scientifique	Travailleurs des services de radiologie médicale en Chine, principalement dans la province de Jiangsu	Rayonnements ionisants Faibles doses	Étudier le lien entre l'exposition professionnelle aux rayonnements X de faible dose et les risques de cancer du sein et de l'œsophage parmi les travailleurs de la radiologie en Chine	L'étude a montré que l'exposition professionnelle aux rayonnements X est associée à un <u>risque accru</u> de cancer du sein (OR ajusté=2.90, IC 95% : 1.19-7.04) et de l'œsophage (OR ajusté=4.19, IC 95% : 1.87-9.38). Elle souligne la nécessité de stratégies de prévention et d'intervention pour réduire les risques de cancer liés à cette exposition.	Les biais incluent la petite taille de l'échantillon de cas de cancer, la collecte incomplète des données sur des facteurs de confusion potentiels comme le tabagisme et la consommation d'alcool, et la possible influence d'autres confondants non mesurés.	1,65
83	A Cytogenetic Approach to the Effects of Low Levels of Ionizing Radiation on Exposed Tunisian Hospital Workers	Sana Bouraoui; Soumaya Mougou; Afef Diras; Faten Tabla; Noha Bouali; Najib Mirzek; Hatem Eghesal; Ali Saad	2013	Article de recherche original	67 travailleurs hospitaliers tunisiens exposés Professionnellement aux rayonnements ionisants, comparés à 43 sujets témoins appariés selon le sexe, l'âge et les habitudes tabagiques.	Rayonnements ionisants Faibles doses	Évaluer les dommages chromosomiques chez les travailleurs hospitaliers tunisiens exposés professionnellement à de faibles doses de rayonnements ionisants.	L'étude a révélé une augmentation significative de la fréquence des micronoyaux dans les lymphocytes des travailleurs exposés par rapport au groupe témoin, ce qui indique des dommages chromosomiques. L'étude conclut que même les faibles niveaux d'exposition aux rayonnements ionisants entraînent des dommages chromosomiques importants, ce qui pourrait avoir des implications pour la surveillance de la santé et l'adoption de mesures préventives.	L'étude souligne l'absence de données sur les doses physiques individuelles en raison de la non-utilisation des dosimètres par la plupart des travailleurs; ainsi que la possibilité de facteurs de confusion dus à d'autres expositions environnementales dans le milieu hospitalier, et la taille relativement petite de l'échantillon qui pourrait limiter la puissance statistique pour détecter certains effets.	2,05
84	Occupational exposure to low doses of ionizing radiation and cataract development: a systematic literature review and perspectives on future studies	Gaëli P. Hammer; Ulrike Scheidemann-Wesp; Florence Samlang-Zeeb; Henryk Wicks; Kazuo Nerishi; Maria Blettner	2013	Article de revue systématique	Travailleurs exposés aux radiations ionisantes à faibles doses, y compris les professionnels de la santé, les pilotes d'avion, et les nettoyeurs de Tchernobyl	Rayonnements ionisants Faibles doses	Examiner les preuves épidémiologiques actuelles sur le développement de cataractes suite à une exposition professionnelle à de faibles doses de rayonnement ionisant, et proposer des orientations pour de futures études	Les études actuelles sont hétérogènes et ne permettent pas de conclure de manière décisive sur la relation dose-réponse entre l'exposition à faibles doses de rayonnement et le développement de cataractes. Des recommandations sont faites pour améliorer les futures recherches	Biais liés à l'hétérogénéité des systèmes de classification des opacités du cristallin, à la variabilité des diagnostics ophtalmologiques, et aux périodes d'observation courtes dans certaines études	1,75
85	ICRP Statement on Tissue Reactions and Early and Late Effects of Radiation in Normal Tissues and Organs – Threshold Doses for Tissue Reactions in a Radiation Protection Context	F.A. Stewart; A.V. Akleyev; M. Hauer-Jensen; J.H. Hendry; N.J. Kleiman; T.J. MacVittie; B.M. Aleman; A.B. Edgar; K. Mabuchi; C.R. Muirhead; R.E. Shore; W.H. Wallace	2012	Rapport	Population générale exposée aux rayonnements ionisants, y compris les travailleurs, les patients en radiothérapie, et les personnes exposées à des incidents nucléaires	Rayonnements ionisants Faibles doses	Évaluer les effets des radiations ionisantes sur les tissus normaux et proposer des seuils de dose en rapport avec la protection radiologique.	Les effets non cancéreux des rayonnements ionisants peuvent se manifester à des doses plus faibles que précédemment estimées, en particulier pour les cataractes et les maladies circulatoires. Des seuils de dose pour ces effets ont été réévalués à la baisse, en prenant en compte de nouvelles données épidémiologiques.	Les incertitudes concernent principalement l'extrapolation des effets observés à des doses élevées vers des doses faibles, ainsi que la variabilité des réponses individuelles aux expositions aux rayonnements ionisants. Les seuils proposés sont basés sur des estimations qui peuvent encore évoluer avec l'acquisition de nouvelles données.	1,26
86	A Model of Cardiovascular Disease Giving a Plausible Mechanism for the Effect of Fractionated Low-Dose Ionizing Radiation Exposure	Mark P. Little; Anna Gola; Ioanna Tzoulaki	2009	Article scientifique	Populations exposées à de faibles doses fractionnées de radiations ionisantes	Rayonnements ionisants Faibles doses	Proposer un modèle expliquant le mécanisme par lequel une exposition fractionnée à faibles doses de radiations ionisantes pourrait provoquer des maladies cardiovasculaires	Le modèle suggère que l'augmentation des concentrations de MDC-1 due à la mort des monocytes pourrait augmenter linéairement avec la dose cumulée, contribuant ainsi au risque accru de maladies cardiovasculaires.	Biais liés aux incertitudes dans les relations dose-réponse, l'extrapolation linéaire à partir des données de doses élevées, et l'absence de prise en compte des processus de réparation cellulaire dans le modèle.	4,01
87	Cancer Risks and Low-Level Radiation in U.S. Shipyard Workers	Genevieve M. Matanoski; James A. Tonascia; Adolfo Corra-Villaseñor; Katherine C. Yates; Nancy Fink; Elizabeth Elliott; Bruce Sanders; Deborah Lantry	2008	Article de recherche	Travailleurs des chantiers navals américains exposés à de faibles doses de rayonnements ionisants	Rayonnements ionisants Faibles doses	Étudier les risques de cancer, y compris le leucémie, les cancers hématopoïétiques, le cancer du poumon et le mésothéliome, associés à l'exposition à de faibles doses de rayonnements ionisants chez les travailleurs des chantiers navals américains.	Les travailleurs exposés à des doses cumulées supérieures à 5 mSv présentaient des risques accrus de leucémie, de cancers hématopoïétiques, de cancer du poumon et de mésothéliome, bien que ces augmentations ne soient significatives que pour les cancers hématopoïétiques. L'étude suggère que l'exposition prolongée à de faibles doses de rayonnements gamma pourrait être associée à ces cancers, avec un risque particulièrement élevé pour le mésothéliome, possiblement aggravé par l'exposition à l'amiante.	La sélection des travailleurs pour le programme d'exposition pourrait introduire un biais de sélection, car les travailleurs en meilleure santé et plus performants sont plus susceptibles d'être choisis. Les différences dans l'exposition à l'amiante entre les groupes de travailleurs pourraient également confondre les résultats, notamment pour le mésothéliome. De plus, les données sur le tabagisme n'étaient pas disponibles pour l'ensemble des participants, ce qui pourrait influencer les résultats concernant le cancer du poumon.	1,90

88	Epidemiological surveillance at Electricité de France—Gaz de France: health assessment of nuclear power plant employees between 1993 and 1998	H. Gros; A. Chevalier; E. Carrié; G. Lathon	2002	Article scientifique	Employés des centrales nucléaires d'EDF en France de 1993 à 1998	Rayonnements ionisants Faibles doses	Évaluer l'état de santé des employés des centrales nucléaires d'EDF par rapport aux autres employés de l'entreprise en analysant les congés maladie, la mortalité et l'incidence du cancer	L'étude a montré que les employés des centrales nucléaires avaient globalement moins de problèmes de santé par rapport aux autres employés d'EDF. Cependant, une augmentation des tumeurs cérébrales malignes a été observée, particulièrement chez les opérateurs. Le myélome multiple n'est pas associé à la dose cumulée de radiation pour l'ensemble des âges. Association significative a été observée entre le myélome multiple et les doses de radiation reçues à des âges plus avancés.	Les biais incluent l'absence de données sur la durée d'exposition, la non-prise en compte des expositions à d'autres risques professionnels, et l'effet travailleur sain.	2,40
89	A Case Control Study of Multiple Myeloma at Four Nuclear Facilities	Steve Wing; David Richardson; Susanne Wolf; Gary Mhian; Doug Crawford-Brow; Joy Wood	2000	Article de revue	Travailleurs du nucléaire dans 4 installations aux USA avant 1979	Rayonnements ionisants Faibles doses	Évaluer une potentielle association entre l'exposition aux faibles doses de radiation ionisante et l'incidence du myélome multiple, en tenant compte de l'âge lors de l'exposition.	Blais de mesure Blais d'estimation des risques	5,14	

Références de la synthèse de la littérature, par article :

Article N°1 (99) ; 2 (97) ; 3 (125) ; 4 (126) ; 5 (127) ; 6 (108) ; 7 (100) ; 8 (102) ; 9 (128) ; 10 (129) ; 11 (82) ; 12 (130) ; 13 (95) ; 14 (131) ; 15 (132) ; 16 (133) ; 17 (134) ; 18 (106) ; 19 (135) ; 20 (98) ; 21 (136) ; 22 (137) ; 23 (138) ; 24 (139) ; 25 (140) ; 26 (105) ; 27 (141) ; 28 (142) ; 29 (143) ; 30 (96) ; 31 (144) ; 32 (145) ; 33 (146) ; 34 (103) ; 35 (147) ; 36 (148) ; 37 (149) ; 38 (150) ; 39 (151) ; 40 (152) ; 41 (153) ; 42 (101) ; 43(154) ; 44 (155) ; 45 (109) ; 46 (156) ; 47 (110) ; 48 (157) ; 49 (158) ; 50 (159) ; 51 (160) ; 52 (161) ; 53 (162) ; 54 (163) ; 55 (164) ; 56 (165) ; 57 (104) ; 58 (166) ; 59 (167) ; 60 (168) ; 61 (169) ; 62 (170) ; 63 (171) ; 64 (172) ; 65 (173) ; 66 (174) ; 67 (175) ; 68 (176) ; 69 (177) ; 70 (178) ; 71 (179) ; 72 (180) ; 73 (181) ; 74 (182) ; 75 (183) ; 76 (184) ; 77 (185) ; 78 (186) ; 79 (187) ; 80 (188) ; 81 (189) ; 82 (155) ; 83 (190) ; 84 (191) ; 85 (192) ; 86 (193) ; 87 (194) ; 88 (195) ; 89 (196).

BIBLIOGRAPHIE

1. Radecki JJ, Aubert B, Cordier G, Fracas P. La mise en œuvre de l'arrêté zonage. Radioprotection. oct 2007;42(4):463-76.
2. Échelle INES pour le classement des incidents et accidents nucléaires [Internet]. MONTRouGE: Autorité de Sûreté Nucléaire; 2023 juin [cité 1 oct 2024] p. 3. Disponible sur: <https://www.asn.fr/l-asn-controle/ines-et-asn-sfro>
3. Inventaire national des matières et déchets radioactifs [Internet]. France: Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs; 2023 déc [cité 7 juill 2024] p. 32. Disponible sur: https://www.andra.fr/sites/default/files/2024-03/ANDRA_Inventaire%20national_Essentiel%202024_V13.pdf
4. Philippe PIRARD, Martine LEDRANS, Delphine CAAMANO, Isabelle MEHL-AUGET, Jérôme ROCHELLE. Estimation de l'impact sanitaire collectif de la contamination des terrains par la radioactivité présente à Gif-sur-Yvette [Internet]. France: Direction départementale des Affaires Sanitaires et Sociales; 2002 avr [cité 7 juill 2024] p. 72. Disponible sur: <https://www.santepubliquefrance.fr/regions/ile-de-france/documents/rapport-synthese/2002/estimation-de-l-impact-sanitaire-collectif-de-la-contamination-des-terrains-par-la-radioactivite-presente-a-gif-sur-yvette>
5. Larousse É. Définitions : radioactivité - Dictionnaire de français Larousse [Internet]. [cité 8 mai 2024]. Disponible sur: <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/radioactivit%C3%A9/66025>
6. Histoire de la radioactivité et de sa découverte autour de l'uranium - Musée Curie [Internet]. [cité 8 mai 2024]. Disponible sur: <https://musee.curie.fr/decouvrir/documentation/histoire-de-la-radioactivite>
7. Boquet A. Physique nucléaire et radioprotection: à l'usage de l'environnement nucléaire. Les Ulis: EDP sciences; 2019. (PROfil).
8. Un atome, c'est quoi ? | IRSN [Internet]. [cité 12 mai 2024]. Disponible sur: <https://www.irsn.fr/savoir-comprendre/dialogue-pedagogie/atome-cest-quoi>
9. Nigrón E. Isotopes radioactifs produits par voies non conventionnelles [Thèse de doctorat en physique]. [Université de Nantes]; 2019.
10. irsn_comprendre-les-bases-de-la-radioactivite.pdf [Internet]. [cité 12 mai 2024]. Disponible sur: https://www.irsn.fr/sites/default/files/documents/connaissances/nucleaire_et_societe/education-radioprotection/bases_radioactivite/irsn_comprendre-les-bases-de-la-radioactivite.pdf

11. Ressources Superprof - Cours théoriques, leçons et exercices [Internet]. 2022 [cité 8 mai 2024]. Le Noyau des Atomes | Superprof. Disponible sur: <https://www.superprof.fr/ressources/physique-chimie/physique-chimie-2nde/noyau-atome-v2.html/>
12. Tableau périodique des éléments. In: Wikipédia [Internet]. 2024 [cité 8 mai 2024]. Disponible sur: https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Tableau_p%C3%A9riodique_des_%C3%A9l%C3%A9ments&oldid=214320185
13. Et un isotope, c'est quoi ? | IRSN [Internet]. [cité 12 mai 2024]. Disponible sur: <https://www.irsn.fr/savoir-comprendre/dialogue-pedagogie/isotope-cest-quoi>
14. Miseur L. La Chimie.net. [cité 8 mai 2024]. Lachimie.net - cours de chimie composé de ressources didactiques pour apprendre les savoirs disciplinaires, les savoir-faire et compétences de base en chimie. Disponible sur: <http://www.lachimie.net>
15. Courbe d'Aston. In: Wikipédia [Internet]. 2022 [cité 8 mai 2024]. Disponible sur: https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Courbe_d%27Aston&oldid=196736645
16. Nigrón E. Isotopes radioactifs produits par voies non conventionnelles.
17. Modéliser l'évolution temporelle d'un système, siège d'une transformation nucléaire (non évaluable à l'épreuve écrite) - Assistance scolaire personnalisée et gratuite - ASP [Internet]. [cité 9 mai 2024]. Disponible sur: https://www.assistancescolaire.com/eleve/terminale/specialite-physique-chimie/viser-le-cours/t_speph_04/print?print=1&printSheet=1
18. myMaxicours [Internet]. [cité 11 mai 2024]. Établir l'équation d'une réaction nucléaire et déterminer le type de radioactivité. Disponible sur: <https://www.maxicours.com/se/cours/etablir-l-equation-d-une-reaction-nucleaire-et-determiner-le-type-de-radioactivite/>
19. Energy.gov [Internet]. [cité 11 mai 2024]. DOE Explains...Beta Decay. Disponible sur: <https://www.energy.gov/science/doe-explainsbeta-decay>
20. p2_ue2_cours6_imagerie_par_rayons_x_ronéo.pdf [Internet]. [cité 11 mai 2024]. Disponible sur: https://l2bichat2017-2018.weebly.com/uploads/1/1/2/5/112587633/p2_ue2_cours6_imagerie_par_rayons_x_ron%C3%A9o.pdf
21. La période radioactive | IRSN [Internet]. [cité 12 mai 2024]. Disponible sur: <https://www.irsn.fr/savoir-comprendre/dialogue-pedagogie/periode-radioactive>
22. laradioactivite.com [Internet]. [cité 12 mai 2024]. Fusion Nucléaire. Disponible sur: https://laradioactivite.com/energie_nucleaire/fusion_nucleaire
23. laradioactivite.com [Internet]. [cité 12 mai 2024]. Fission nucléaire. Disponible sur: https://laradioactivite.com/energie_nucleaire/fission

24. Courrier-Service. Fission et fusion nucléaire : quelles différences ? [Internet]. [cité 26 sept 2024]. Disponible sur: <https://www.republicain-lorrain.fr/science-et-technologie/2023/04/05/fission-et-fusion>
25. Le noyau atomique/Pénétration des rayonnements radioactifs dans la matière — Wikilivres [Internet]. [cité 12 mai 2024]. Disponible sur: https://fr.wikibooks.org/wiki/Le_noyau_atomique/P%C3%A9n%C3%A9tration_des_rayonnements_radioactifs_dans_la_mati%C3%A8re
26. laradioactivite.com [Internet]. [cité 12 mai 2024]. Effets des R.I. Disponible sur: https://laradioactivite.com/questionsdoses/effets_rayonnements_ionisants
27. zz_hugo. laradioactivite.com. 2020 [cité 12 mai 2024]. Effet Photoelectrique. Disponible sur: https://laradioactivite.com/le-phenomene/effet_photoelectrique
28. zz_hugo. laradioactivite.com. 2020 [cité 12 mai 2024]. Effet Compton. Disponible sur: https://laradioactivite.com/le-phenomene/effet_compton
29. Matérialisation de l'énergie | Le monde en images [Internet]. [cité 26 sept 2024]. Disponible sur: <http://monde.ccdmd.qc.ca/ressource/?id=55153>
30. zz_hugo. laradioactivite.com. 2020 [cité 12 mai 2024]. Radiosensibilité. Disponible sur: <https://laradioactivite.com/questionsdoses/radiosensibilite>
31. zz_hugo. laradioactivite.com. 2020 [cité 12 mai 2024]. Effets déterministes. Disponible sur: https://laradioactivite.com/questionsdoses/effets_deterministes
32. HECTOR C. Les effets biologiques des rayonnements ionisants. 2016 juin 23; Pôle Santé au Travail - Métropole Nord.
33. Garin E. Effets biologiques des rayonnements ionisants [Internet]. 2018 [cité 2 août 2024]; Faculté de médecine de Rennes. Disponible sur: <https://slideplayer.fr/slide/13634878/>
34. zz_hugo. laradioactivite.com. 2020 [cité 12 mai 2024]. Effets probabilistes. Disponible sur: https://laradioactivite.com/questionsdoses/effets_probabilistes
35. Risques de leucémies et exposition aux rayonnements ionisants. Agence de Sureté Nucléaire; 2015 août p. 60.
36. Ory C, Leboulleux S, Salvatore D, Le Guen B, De Vathaire F, Chevillard S, et al. Consequences of atmospheric contamination by radioiodine: the Chernobyl and Fukushima accidents. *Endocrine*. 1 févr 2021;71(2):298-309.
37. El Ghissassi F, Baan R, Straif K, Grosse Y, Secretan B, Bouvard V, et al. A review of human carcinogens—Part D: radiation. *Lancet Oncol*. 1 août 2009;10(8):751-2.
38. nucléaire A de sûreté. La radioactivité [Internet]. [cité 12 mai 2024]. Disponible sur: <https://www.asn.fr/l-asn-informe/situations-d-urgence/questions-reponses/la-radioactivite>

39. rarnol. La radioactivité, c'est quoi ? [Internet]. Sfen. 2020 [cité 12 mai 2024]. Disponible sur: <https://www.sfen.org/energie-nucleaire/surete-nucleaire/radioactivite>
40. Rannou A, Aubert B, Scanff P. Exposition de la population française aux rayonnements ionisants [Internet]. Fontenay-aux-Roses: IRSN; 2006 mars [cité 2 août 2024]. Disponible sur: <http://www.irsn.fr>
41. zz_hugo. laradioactivite.com. 2020 [cité 12 mai 2024]. Expositions Internes. Disponible sur: https://laradioactivite.com/questionsdoses/exposition_interne
42. zz_hugo. laradioactivite.com. 2020 [cité 12 mai 2024]. Expositions externes. Disponible sur: <https://laradioactivite.com/questionsdoses/expositionsexternes>
43. Utilisation de la radioactivité [Internet]. [cité 12 mai 2024]. Disponible sur: <https://www.andra.fr/les-dechets-radioactifs/la-radioactivite/utilisation-de-la-radioactivite>
44. Chapitre2_RI_Notions_fondamentales.pdf [Internet]. [cité 12 mai 2024]. Disponible sur: https://www.dgdr.cnrs.fr/sst/CNPS/guides/doc/radioprotection/Chapitre2_RI_Notions_fondamentales.pdf
45. Exposition de la population française aux rayonnements ionisants - Bilan 2014-2019. Fontenay-aux-Roses: IRSN; 2021 juin p. 88. Report No.: IRSN/2021-00108.
46. Les unités de mesure | IRSN [Internet]. [cité 12 mai 2024]. Disponible sur: <https://www.irsn.fr/savoir-comprendre/dialogue-pedagogie/unites-mesure>
47. Les concepts de dose | IRSN [Internet]. [cité 12 mai 2024]. Disponible sur: <https://www.irsn.fr/savoir-comprendre/dialogue-pedagogie/concepts-dose>
48. CEA. CEA/Découvrir & Comprendre. CEA; 2016 [cité 12 mai 2024]. Les grandeurs et unités de la radioactivité. Disponible sur: <https://www.cea.fr/comprendre/Pages/radioactivite/essentiel-sur-grandeur-unites-radioactivite.aspx>
49. Mieux comprendre les faibles doses | IRSN [Internet]. [cité 3 sept 2024]. Disponible sur: <https://www.irsn.fr/savoir-comprendre/sante/mieux-comprendre-faibles-doses>
50. zz_hugo. laradioactivite.com. 2020 [cité 12 mai 2024]. Réglementation et contrôle. Disponible sur: <https://laradioactivite.com/questionsdoses/reglementationcontrole>
51. zz_hugo. laradioactivite.com. 2020 [cité 12 mai 2024]. Doses : limites légales. Disponible sur: <https://laradioactivite.com/questionsdoses/limitesdoses>
52. Rayonnements ionisants. Réglementation et démarche de prévention - Risques - INRS [Internet]. [cité 12 mai 2024]. Disponible sur: <https://www.inrs.fr/risques/rayonnements-ionisants/reglementation.html>

53. Pub1578f_web.pdf [Internet]. [cité 12 mai 2024]. Disponible sur: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1578f_web.pdf
54. Rayonnements ionisants. Suivi de l'état de santé des travailleurs - Risques - INRS [Internet]. [cité 21 août 2024]. Disponible sur: <https://www.inrs.fr/risques/rayonnements-ionisants/suivi-etat-sante-travailleurs.html>
55. Curie M, Curie P. Sur une substance nouvelle radio-active contenue dans la pechblende. *Comptes Rendus Académie Sci.* 1898;127:175-8.
56. Emsley J. *Nature's building blocks: an A-Z guide to the elements*. Reprinted with corrections. Oxford: Oxford Univ. Press; 2003. 538 p.
57. Thompson WB. Historical Uses of Radium and Radon in Medicine. *Radiat Res.* 1963;18(1):1-17.
58. Mould RF. The discovery of radium in 1898 by Maria Sklodowska-Curie (1867-1934) and Pierre Curie (1859-1906) with commentary on their life and times. *Br J Radiol.* 1 déc 1998;71(852):1229-54.
59. Clark HL, Goodman LJ. The Radium Dial Painters: A Review of Incidents and Effects. *Am J Public Health.* 1929;19(8):821-9.
60. Les radionucléides d'origine naturelle | IRSN [Internet]. [cité 27 sept 2024]. Disponible sur: <https://www.irsn.fr/savoir-comprendre/environnement/radionucleides-dorigine-naturelle>
61. Cothorn CR. *Radon, Radium, and Uranium in Drinking Water* [Internet]. 0 éd. CRC Press; 2014 [cité 2 sept 2024]. Disponible sur: <https://www.taylorfrancis.com/books/9781498710701>
62. Rowland RE. Radium in Humans: A Review of U.S. Studies. *Health Phys.* 1994;67(5):577-86.
63. Martland HS. The Occurrence of Malignancy in Radioactive Persons. *Am J Cancer.* 1925;4(1):487-508.
64. Moore K. *The radium girls: the dark story of America's shining women*. Unabridged. Minneapolis, Minnesota: HighBridge Audio; 2017.
65. Badash L. *Radioactivity in America: growth and decay of a science*. Baltimore: Johns Hopkins University Press; 1979. 327 p.
66. Craig C, Radchenko SS. *The Atomic Bomb and the Origins of the Cold War* [Internet]. Yale University Press; 2017 [cité 2 sept 2024]. Disponible sur: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.12987/9780300142655/html>
67. Paterson R, Parker HM. A Dosage System for Gamma Ray Therapy. *Br J Radiol.* oct 1934;7(82):592-632.

68. Baskar R, Lee KA, Yeo R, Yeoh KW. Cancer and Radiation Therapy: Current Advances and Future Directions. *Int J Med Sci.* 2012;9(3):193-9.
69. Podgoršak EB, International Atomic Energy Agency, éditeurs. Radiation oncology physics: a handbook for teachers and students. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2005. 657 p.
70. Halperin EC, Perez CA, Brady LW. Perez and Brady's principles and practice of radiation oncology. 5th ed. Philadelphia: Wolters Kluwer - Lippincott Williams & Wilkins; 2008.
71. Delaney G, Jacob S, Featherstone C, Barton M. The role of radiotherapy in cancer treatment: Estimating optimal utilization from a review of evidence-based clinical guidelines. *Cancer.* 15 sept 2005;104(6):1129-37.
72. Internationale Atomenergie-Organisation. Radiation protection and safety of radiation sources: international basic safety standards; general safety requirements. Vienna: Internat. Atomic Energy Agency; 2014. 436 p. (IAEA safety standards series General safety requirements).
73. Nenot JC. Recommandations 2007 de la Commission internationale de protection radiologique. Paris: Éd. Tec & doc; 2009. (Publication de la CIPR).
74. Nuclear Regulatory Commission (NRC), éditeur. Standards for Protection Against Radiation. 2024. 160 p. (NRC Regulations; vol. 10 CFR Part 20).
75. Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN), éditeur. Réglementation relative aux substances radioactives. France; 2021.
76. On the behaviour of the Becquerel and Röntgen rays in a magnetic field. *Proc R Soc Lond.* 31 déc 1900;66(424-433):75-9.
77. Dorn FE. Ueber die von radioaktiven Substanzen ausgesandte Emanation ... [Internet]. *Naturforsch. Gesellsch.;* 1901. Disponible sur: <https://books.google.fr/books?id=vnFEcgAACAAJ>
78. MacNaught AD, Wilkinson A. Compendium of chemical terminology: IUPAC recommendations. 2. ed. Oxford: Blackwell Science; 1997. 450 p. (IUPAC chemical nomenclature series).
79. International Commission on Radiological Protection, éditeur. Protection against Radon-200 at home and at work. 1. ed. Oxford: Pergamon Press; 1994. 45 p. (Annals of the ICRP).
80. Zeeb H, Shannoun F, World Health Organization. WHO handbook on indoor radon: a public health perspective. 2009 [cité 2 sept 2024]; Disponible sur: <https://iris.who.int/handle/10665/44149>
81. United Nations, éditeur. Sources and effects of ionizing radiation: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation: UNSCEAR 2000 report to the General Assembly, with scientific annexes. New York: United Nations; 2000. 2 p.

82. Kelly-Reif K, Bertke SJ, Rage E, Demers PA, Fenske N, Deffner V, et al. Radon and lung cancer in the pooled uranium miners analysis (PUMA): highly exposed early miners and all miners. *Occup Environ Med.* juill 2023;80(7):385-91.
83. D'où vient le radon ? | IRSN [Internet]. [cité 27 sept 2024]. Disponible sur: <https://www.irsn.fr/savoir-comprendre/environnement/dou-vient-radon>
84. Otton JK. *The geology of radon.* Denver: US Geological Survey; 1992. 28 p.
85. Schabath MB, Cote ML. Cancer Progress and Priorities: Lung Cancer. *Cancer Epidemiol Biomarkers Prev.* 1 oct 2019;28(10):1563-79.
86. Internationale Atomenergie-Organisation, Internationale Atomenergie-Organisation, Internationales Arbeitsamt, éditeurs. *Radiation protection against radon in workplaces other than mines.* Vienna: IAEA; 2003. 74 p. (Safety reports series).
87. Lubenau JO, Beck HL. The role of radon in medical treatments: A retrospective analysis. *Health Phys.* nov 1990;59(5):559-63.
88. Sukanya S, Noble J, Joseph S. Application of radon (^{222}Rn) as an environmental tracer in hydrogeological and geological investigations: An overview. *Chemosphere.* sept 2022;303:135141.
89. Lubin JH, Boice JD, Edling C, Hornung RW, Howe GR, Kunz E, et al. Lung Cancer in Radon-Exposed Miners and Estimation of Risk From Indoor Exposure. *JNCI J Natl Cancer Inst.* 7 juin 1995;87(11):817-27.
90. Riudavets M, Garcia De Herreros M, Besse B, Mezquita L. Radon and Lung Cancer: Current Trends and Future Perspectives. *Cancers.* 27 juin 2022;14(13):3142.
91. Luebeck EG, Heidenreich WF, Hazelton WD, Paretzke HG, Moolgavkar SH. Biologically based analysis of the data for the Colorado uranium miners cohort: age, dose and dose-rate effects. *Radiat Res.* oct 1999;152(4):339-51.
92. IAEA. PROTECTION OF THE PUBLIC AGAINST EXPOSURE INDOORS DUE TO RADON AND OTHER NATURAL SOURCES OF... RADIATION. S.I.: INTL ATOMIC ENERGY AGENCY; 2023.
93. Lecomte JF, Solomon S, Takala J, Jung T, Strand P, Murith C, et al. ICRP Publication 126: Radiological Protection against Radon Exposure. *Ann ICRP.* sept 2014;43(3):5-73.
94. *Guide pratique - Prévention du risque radon.* Paris: Direction Générale du Travail; 2020 p. 50.
95. Kelly-Reif K, Sandler DP, Shore D, Schubauer-Berigan M, Troester M, Nylander-French L, et al. Lung and extrathoracic cancer incidence among underground uranium miners exposed to radon progeny in the Příbram region of the Czech Republic: a case-cohort study. *Occup Environ Med.* févr 2022;79(2):102-8.

96. Zablotska LB, Lane RSD, Frost SE, Thompson PA. Leukemia, lymphoma and multiple myeloma mortality (1950–1999) and incidence (1969–1999) in the Eldorado uranium workers cohort. *Environ Res.* avr 2014;130:43-50.
97. Nakamura E, Makishima A, Hagino K, Okabe K. Accumulation of radium in ferruginous protein bodies formed in lung tissue: association of resulting radiation hotspots with malignant mesothelioma and other malignancies. *Proc Jpn Acad Ser B.* 2009;85(7):229-39.
98. Kreuzer M, Dufey F, Marsh JW, Nowak D, Schnelzer M, Walsh L. Mortality from cancers of the extra-thoracic airways in relation to radon progeny in the Wismut cohort, 1946–2008. *Int J Radiat Biol.* nov 2014;90(11):1030-5.
99. Priest ND, Dauer LT, Hoel DG. Administration of lower doses of radium-224 to ankylosing spondylitis patients results in no evidence of significant overall detriment. Akiba S, éditeur. *PLOS ONE.* 30 avr 2020;15(4):e0232597.
100. Milder CM, Howard SC, Ellis ED, Golden AP, Cohen SS, Mumma MT, et al. Third mortality follow-up of the Mallinckrodt uranium processing workers, 1942–2019. *Int J Radiat Biol.* févr 2024;100(2):161-75.
101. Loganovsky K, Perchuk I, Marazziti D. Workers on transformation of the shelter object of the Chernobyl nuclear power plant into an ecologically-safe system show qEEG abnormalities and cognitive dysfunctions: A follow-up study. *World J Biol Psychiatry.* 23 mai 2015;1-8.
102. Brugge D, Buchner V. Radium in the environment: exposure pathways and health effects. *Rev Environ Health.* 1 janv 2012;27(1):1-17.
103. Dessau JC. Le radon au Québec: évaluation du risque à la santé et analyse critique des stratégies d'intervention : avis. Québec (Province): Direction des risques biologiques, environnementaux et occupationnels, Institut national de santé publique du Québec; 2005.
104. Richardson DB, Wing S. Lung cancer mortality among workers at a nuclear materials fabrication plant. *Am J Ind Med.* févr 2006;49(2):102-11.
105. Kreuzer M, Fenske N, Schnelzer M, Walsh L. Lung cancer risk at low radon exposure rates in German uranium miners. *Br J Cancer.* nov 2015;113(9):1367-9.
106. Kelly-Reif K, Sandler DP, Shore D, Schubauer-Berigan M, Troester MA, Nylander-French L, et al. Mortality and cancer incidence among underground uranium miners in the Czech Republic 1977–1992. *Occup Environ Med.* août 2019;76(8):511-8.
107. Delva F, Margery J, Brochard P, Laurent F, Petitprez K, Pairon JC, et al. Recommandations de bonne pratique : surveillance médico-professionnelle des travailleurs exposés ou ayant été exposés à des agents cancérigènes pulmonaires. *Arch Mal Prof Environ.* juin 2016;77(3):579-620.
108. Ronckers CM, Van Leeuwen FE, Hayes RB, Verduijn PG, Stovall M, Land CE. Cancer Incidence After Nasopharyngeal Radium Irradiation: *Epidemiology.* sept 2002;13(5):552-60.

109. Richardson DB, Daniels RD, Hamra GB, Leuraud K. Risk of cancer from occupational exposure to ionising radiation: retrospective cohort study of workers in France, the United Kingdom, and the United States (INWORKS).
110. Zablotska LB, Bazyka D, Lubin JH, Gudzenko N, Little MP, Hatch M, et al. Radiation and the Risk of Chronic Lymphocytic and Other Leukemias among Chernobyl Cleanup Workers. *Environ Health Perspect.* janv 2013;121(1):59-65.
111. Hamra GB, Richardson DB, Cardis E, Daniels RD, Gillies M, O'Hagan JA, et al. Cohort Profile: The International Nuclear Workers Study (INWORKS). *Int J Epidemiol.* juin 2016;45(3):693-9.
112. Suivi post-professionnel ou post-exposition des salariés : quelle réglementation ? - Actualité - INRS [Internet]. [cité 3 sept 2024]. Disponible sur: <https://www.inrs.fr/publications/juridique/focus-juridiques/focus-juridique-suivi-post-professionnel.html>
113. Felicie N. Le cadre juridique du suivi post-professionnel et du suivi post-exposition. *Réf En Santé Au Trav.* mars 2023;173(TP52):99-104.
114. Roselyne D. Dépistage du cancer bronchopulmonaire par scanner thoracique faible dose sans injection : Actualisation de l'avis de 2016. Haute Autorité de Santé; 2021.
115. De Koning HJ, Van Der Aalst CM, De Jong PA, Scholten ET, Nackaerts K, Heuvelmans MA, et al. Reduced Lung-Cancer Mortality with Volume CT Screening in a Randomized Trial. *N Engl J Med.* 6 févr 2020;382(6):503-13.
116. Folio M. Tumeurs osseuses malignes primitives [Internet]. SFCE - Société Française Cancers Enfant. 2022 [cité 3 sept 2024]. Disponible sur: <https://sf-cancers-enfant.com/patients-et-proches/tumeurs-osseuses-malignes-primitives>
117. Société Française d'Hématologie. Information patient leucémie aiguë myéloïde. 2009.
118. Plan national nutrition santé - Bilan 2019-2023. Paris: MINISTÈRE DE LA SANTÉ ET DE LA PRÉVENTION- DIRECTION GÉNÉRALE DE LA SANTÉ; 2024 juin p. 179.
119. Programme national de lutte contre le tabac 2023-2027. Paris: MINISTÈRE DE LA SANTÉ ET DE LA PRÉVENTION- DIRECTION GÉNÉRALE DE LA SANTÉ; 2023 nov p. 60.
120. Croisile B. Le Mini-Mental State, un incontournable de la neuropsychologie. *Sci Soc Santé.* déc 2014;32(4):71-7.
121. Un suivi ophtalmologique régulier est indispensable après 65 ans [Internet]. 2022 [cité 3 sept 2024]. Disponible sur: <https://www.pour-les-personnes-agees.gouv.fr/preserver-son-autonomie/preserver-son-autonomie-et-sa-sante/undefinedpreserver-son-autonomie/preserver-son-autonomie-et-sa-sante/un-suivi-ophtalmologique-regulier-est-indispensable-apres-65-ans>
122. Haute Autorité de Santé [Internet]. [cité 3 sept 2024]. Suivi post-professionnel des personnes exposées à l'amiante – Mise à jour du protocole et de la grille de lecture

d'imagerie. Disponible sur: https://www.has-sante.fr/jcms/p_3099768/fr/suivi-post-professionnel-des-personnes-exposees-a-l-amiante-mise-a-jour-du-protocole-et-de-la-grille-de-lecture-d-imagerie

123. RG 6. Tableau - Tableaux des maladies professionnelles - INRS [Internet]. [cité 3 sept 2024]. Disponible sur: <https://www.inrs.fr/publications/bdd/mp/tableau.html?refINRS=RG%206>
124. Page MJ, McKenzie JE, Bossuyt PM, Boutron I, Hoffmann TC, Mulrow CD, et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*. 29 mars 2021;n71.
125. Wick RR, Atkinson MJ, Nekolla EA. Incidence of leukaemia and other malignant diseases following injections of the short-lived α -emitter 224Ra into man. *Radiat Environ Biophys*. août 2009;48(3):287-94.
126. Wick RR, Nekolla EA, Gaubitz M, Schulte TL. Increased risk of myeloid leukaemia in patients with ankylosing spondylitis following treatment with radium-224. *Rheumatology*. 11 mars 2008;47(6):855-9.
127. Karunanayake CP, McDuffie HH, Dosman JA, Spinelli JJ, Pahwa P. Occupational exposures and non-Hodgkin's lymphoma: Canadian case-control study. *Environ Health*. déc 2008;7(1):44.
128. Eidemüller M, Holmberg E, Jacob P, Lundell M, Karlsson P. Breast cancer risk among Swedish hemangioma patients and possible consequences of radiation-induced genomic instability. *Mutat Res Mol Mech Mutagen*. oct 2009;669(1-2):48-55.
129. Villeneuve PJ, Morrison HI, Volesky K, Lane RSD. Circulatory system disease mortality and occupational exposure to radon progeny in the cohort of Newfoundland Fluorspar Miners between 1950 and 2016. *Int Arch Occup Environ Health*. avr 2023;96(3):411-8.
130. Zeng X, Berriault C, Arrandale VH, DeBono NL, Harris MA, Demers PA. Radon exposure and risk of neurodegenerative diseases among male miners in Ontario, Canada: A cohort study. *Am J Ind Med*. févr 2023;66(2):132-41.
131. Richardson DB, Rage E, Demers PA, Do MT, Fenske N, Deffner V, et al. Lung Cancer and Radon: Pooled Analysis of Uranium Miners Hired in 1960 or Later. *Environ Health Perspect*. mai 2022;130(5):057010.
132. Laurier D, Marsh JW, Rage E, Tomasek L. Miner studies and radiological protection against radon. *Ann ICRP*. déc 2020;49(1_suppl):57-67.
133. Kelly-Reif K, Sandler DP, Shore D, Schubauer-Berigan MK, Troester MA, Nylander-French L, et al. Radon and cancer mortality among underground uranium miners in the Příbram region of the Czech Republic. *Am J Ind Med*. oct 2020;63(10):859-67.

134. Lane RSD, Tomášek L, Zablotska LB, Rage E, Momoli F, Little J. Low radon exposures and lung cancer risk: joint analysis of the Czech, French, and Beaverlodge cohorts of uranium miners. *Int Arch Occup Environ Health*. juill 2019;92(5):747-62.
135. Ramkissoon A, Navaranjan G, Berriault C, Villeneuve PJ, Demers PA, Do MT. Histopathologic Analysis of Lung Cancer Incidence Associated with Radon Exposure among Ontario Uranium Miners. *Int J Environ Res Public Health*. 31 oct 2018;15(11):2413.
136. Heidenreich WF, Tomasek L, Grosche B, Leuraud K, Laurier D. Lung cancer mortality in the European uranium miners cohorts analyzed with a biologically based model taking into account radon measurement error. *Radiat Environ Biophys*. août 2012;51(3):263-75.
137. Kulich M, Řeřicha V, Řeřicha R, Shore DL, Sandler DP. Incidence of non-lung solid cancers in Czech uranium miners: A case-cohort study. *Environ Res*. avr 2011;111(3):400-5.
138. Kreuzer M, Grosche B, Schnelzer M, Tschense A, Dufey F, Walsh L. Radon and risk of death from cancer and cardiovascular diseases in the German uranium miners cohort study: follow-up 1946-2003. *Radiat Environ Biophys*. mai 2010;49(2):177-85.
139. Bochicchio F. The radon issue: Considerations on regulatory approaches and exposure evaluations on the basis of recent epidemiological results. *Appl Radiat Isot*. nov 2008;66(11):1561-6.
140. Veiga LHS, Amaral ECS, Colin D, Koifman S. A retrospective mortality study of workers exposed to radon in a Brazilian underground coal mine. *Radiat Environ Biophys*. juill 2006;45(2):125-34.
141. Tirmarche M, Harrison J, Laurier D, Blanchardon E, Paquet F, Marsh J. Risk of lung cancer from radon exposure: contribution of recently published studies of uranium miners. *Ann ICRP*. oct 2012;41(3-4):368-77.
142. Sobkeng Goufack E. Cancers et environnement : impact de l'environnement sur le développement des cancers digestifs: Hegel. 1 juill 2015;N° 3(3):240-1.
143. Bey P. Risques des radiations ionisantes. *Rev Prat*. 2015;65.
144. Laurier D, Hill C. Risque de cancer lié aux radiations ionisantes. *Rev Prat*. 2013;63.
145. Zablotska LB, Richardson DB, Golden A, Pasqual E, Smith B, Rage Estelle, et al. The epidemiology of lung cancer following radiation exposure. *Int J Radiat Biol*. 4 mars 2023;99(3):569-80.
146. Zablotska LB, Lane RSD, Randhawa K. Association between exposures to radon and γ -ray radiation and histologic type of lung cancer in Eldorado uranium mining and milling workers from Canada. *Cancer*. sept 2022;128(17):3204-16.
147. Lopes J, Baudin C, Rousseau F, Roy H, Lestaevel P, Caër-Lorho S, et al. Central nervous system tumours and occupational ionising radiation exposure: a nested case-control study among the ORICAMs cohort of healthcare workers in France. *BMJ Open*. juin 2024;14(6):e084285.

148. Zhuntova G, Bannikova M, Azizova T. Incidence risk of hepatobiliary malignant neoplasms in the cohort of workers chronically exposed to ionizing radiation. *Sci Rep.* 30 juill 2024;14(1):17561.
149. Kelly-Reif K, Bertke SJ, Daniels RD, Richardson DB, Schubauer-Berigan MK. Ionizing radiation and solid cancer mortality among US nuclear facility workers. *Int J Epidemiol.* 2 août 2023;52(4):1015-24.
150. Della Vecchia E, Modenese A, Loney T, Muscatello M, Silva Paulo M, Rossi G, et al. Risk of cataract in health care workers exposed to ionizing radiation: a systematic review. *Med Lav Work Environ Health.* 31 août 2020;111(4):269-84.
151. Kitahara CM, Preston DL, Neta G, Little MP, Doody MM, Simon SL, et al. Occupational radiation exposure and thyroid cancer incidence in a cohort of U.S. radiologic technologists, 1983–2013. *Int J Cancer.* nov 2018;143(9):2145-9.
152. Schüz J, Deltour I, Krestinina LY, Tsareva YV, Tolstykh EI, Sokolnikov ME, et al. In utero exposure to radiation and haematological malignancies: pooled analysis of Southern Urals cohorts. *Br J Cancer.* janv 2017;116(1):126-33.
153. Wiesel A, Stolz G, Queisser-Wahrendorf A. Evidence for a teratogenic risk in the offspring of health personnel exposed to ionizing radiation?! *Birt Defects Res A Clin Mol Teratol.* juin 2016;106(6):475-9.
154. Auvinen A, Kivelä T, Heinävaara S, Mrena S. Eye Lens Opacities Among Physicians Occupationally Exposed to Ionizing Radiation. *Ann Occup Hyg.* août 2015;59(7):945-8.
155. Lee T, Sigurdson AJ, Preston DL, Cahoon EK, Freedman DM, Simon SL, et al. Occupational ionising radiation and risk of basal cell carcinoma in US radiologic technologists (1983–2005). *Occup Environ Med.* déc 2015;72(12):862-9.
156. Drubay D, Ancelet S, Acker A, Kreuzer M, Laurier D, Rage E. Kidney cancer mortality and ionizing radiation among French and German uranium miners. *Radiat Environ Biophys.* août 2014;53(3):505-13.
157. Daniels RD, Bertke S, Waters KM, Schubauer-Berigan MK. Risk of leukaemia mortality from exposure to ionising radiation in US nuclear workers: a pooled case-control study. *Occup Environ Med.* janv 2013;70(1):41-8.
158. Karipidis KK, Benke G, Sim MR, Fritschi L, Vajdic C, Krickler A, et al. Non-Hodgkin lymphoma and occupational radiation exposure assessed using local data. *Occup Med.* 1 sept 2009;59(6):437-9.
159. Haddy N, Andriamboavonjy T, Paoletti C, Dondon MG, Mousannif A, Shamsaldin A, et al. Thyroid adenomas and carcinomas following radiotherapy for a hemangioma during infancy. *Radiother Oncol.* nov 2009;93(2):377-82.

160. Boehm BO, Steinert M, Dietrich JW, Peter RU, Belyi D, Wagemaker G, et al. Thyroid examination in highly radiation-exposed workers after the Chernobyl accident. *Eur J Endocrinol.* avr 2009;160(4):625-30.
161. Lie JAS, Kjaerheim K, Tynes T. Ionizing radiation exposure and cancer risk among Norwegian nurses. *Eur J Cancer Prev.* août 2008;17(4):369-75.
162. Blettner M, Schlehofer B, Samkange-Zeeb F, Berg G, Schlaefer K, Schüz J. Medical exposure to ionising radiation and the risk of brain tumours: Interphone study group, Germany. *Eur J Cancer.* sept 2007;43(13):1990-8.
163. Karipidis KK, Benke G, Sim MR, Kauppinen T, Giles G. Occupational exposure to ionizing and non-ionizing radiation and risk of glioma. *Occup Med.* 4 juin 2007;57(7):518-24.
164. Karipidis KK, Benke G, Sim MR, Kauppinen T, Kricker A, Hughes AM, et al. Occupational exposure to ionizing and non-ionizing radiation and risk of non-Hodgkin lymphoma. *Int Arch Occup Environ Health.* août 2007;80(8):663-70.
165. Jartti P, Pukkala E, Uitti J, Auvinen A. Cancer incidence among physicians occupationally exposed to ionizing radiation in Finland. *Scand J Work Environ Health.* oct 2006;32(5):368-73.
166. Wing S, Richardson DB. Age at exposure to ionising radiation and cancer mortality among Hanford workers: follow up through 1994. *Occup Environ Med.* juill 2005;62(7):465-72.
167. Yoshinaga S, Hauptmann M, Sigurdson AJ, Doody MM, Freedman DM, Alexander BH, et al. Nonmelanoma skin cancer in relation to ionizing radiation exposure among U.S. radiologic technologists. *Int J Cancer.* 10 juill 2005;115(5):828-34.
168. Völzke H, Werner A, Wallaschofski H, Friedrich N, Robinson DM, Kindler S, et al. Occupational Exposure to Ionizing Radiation Is Associated with Autoimmune Thyroid Disease. *J Clin Endocrinol Metab.* 1 août 2005;90(8):4587-92.
169. Trerotoli P, Ciampolillo A, Marinelli G, Giorgino R, Serio G. Prevalence of thyroid nodules in an occupationally radiation exposed group: a cross sectional study in an area with mild iodine deficiency. *BMC Public Health.* déc 2005;5(1):73.
170. Sibley RF, Moscato BS, Wilkinson GS, Natarajan N. Nested case-control study of external ionizing radiation dose and mortality from dementia within a pooled cohort of female nuclear weapons workers. *Am J Ind Med.* oct 2003;44(4):351-8.
171. Doyle P, Maconochie N, Roman E, Davies G, Smith PG, Beral V. Fetal death and congenital malformation in babies born to nuclear industry employees: report from the nuclear industry family study. *The Lancet.* oct 2000;356(9238):1293-9.
172. Wakeford R. Overview of epidemiological studies of nuclear workers: opportunities, expectations, and limitations *. *J Radiol Prot.* 1 déc 2021;41(4):1075-92.

173. Lopes J, Baudin C, Feuardent J, Roy H, Caër-Lorho S, Leuraud K, et al. Cohort profile: ORICAMs, a French cohort of medical workers exposed to low-dose ionizing radiation. Sanusi MSM, éditeur. PLOS ONE. 8 juin 2023;18(6):e0286910.
174. Hinksman CA, Haylock RGE, Gillies M. Cerebrovascular Disease Mortality after occupational Radiation Exposure among the UK National Registry for Radiation Workers Cohort. *Radiat Res* [Internet]. 9 févr 2022 [cité 2 sept 2024];197(5). Disponible sur: <https://bioone.org/journals/radiation-research/volume-197/issue-5/RADE-20-00204.1/Cerebrovascular-Disease-Mortality-after-occupational-Radiation-Exposure-among-the-UK/10.1667/RADE-20-00204.1.full>
175. Friedman-Jimenez G, Kato I, Factor-Litvak P, Shore R. Low-dose ionizing radiation and cancer mortality among enlisted men stationed on nuclear-powered submarines in the United States Navy. *Int J Radiat Biol*. 3 oct 2022;98(10):1542-50.
176. Tapio S, Little MP, Kaiser JC, Impens N, Hamada N, Georgakilas AG, et al. Ionizing radiation-induced circulatory and metabolic diseases. *Environ Int*. janv 2021;146:106235.
177. Little MP, Azizova TV, Hamada N. Low- and moderate-dose non-cancer effects of ionizing radiation in directly exposed individuals, especially circulatory and ocular diseases: a review of the epidemiology. *Int J Radiat Biol*. 3 juin 2021;97(6):782-803.
178. Lee WJ, Ko S, Bang YJ, Choe SA, Choi Y, Preston DL. Occupational radiation exposure and cancer incidence in a cohort of diagnostic medical radiation workers in South Korea. *Occup Environ Med*. déc 2021;78(12):876-83.
179. Little MP, Azizova TV, Bazyka D, Bouffler SD, Cardis E, Chekin S, et al. Systematic Review and Meta-analysis of Circulatory Disease from Exposure to Low-Level Ionizing Radiation and Estimates of Potential Population Mortality Risks. *Environ Health Perspect*. nov 2012;120(11):1503-11.
180. Hauptmann M, Daniels RD, Cardis E, Cullings HM, Kendall G, Laurier D, et al. Epidemiological Studies of Low-Dose Ionizing Radiation and Cancer: Summary Bias Assessment and Meta-Analysis. *JNCI Monogr*. 1 juill 2020;2020(56):188-200.
181. Linet MS, Schubauer-Berigan MK, Berrington De González A. Outcome Assessment in Epidemiological Studies of Low-Dose Radiation Exposure and Cancer Risks: Sources, Level of Ascertainment, and Misclassification. *JNCI Monogr*. 1 juill 2020;2020(56):154-75.
182. Gillies M, Haylock R, Hunter N, Zhang W. Risk of Leukemia Associated with Protracted Low-Dose Radiation Exposure: Updated Results from the National Registry for Radiation Workers Study. *Radiat Res*. 26 août 2019;192(5):527.
183. Azizova TV, Bannikova MV, Grigoryeva ES, Rybkina VL. Risk of malignant skin neoplasms in a cohort of workers occupationally exposed to ionizing radiation at low dose rates. Akiba S, éditeur. PLOS ONE. 5 oct 2018;13(10):e0205060.

184. McLean AR, Adlen EK, Cardis E, Elliott A, Goodhead DT, Harms-Ringdahl M, et al. A restatement of the natural science evidence base concerning the health effects of low-level ionizing radiation. *Proc R Soc B Biol Sci.* 13 sept 2017;284(1862):20171070.
185. Preston DL, Kitahara CM, Freedman DM, Sigurdson AJ, Simon SL, Little MP, et al. Breast cancer risk and protracted low-to-moderate dose occupational radiation exposure in the US Radiologic Technologists Cohort, 1983–2008. *Br J Cancer.* oct 2016;115(9):1105-12.
186. Kitahara CM, Linet MS, Rajaraman P, Ntowe E, Berrington De González A. A New Era of Low-Dose Radiation Epidemiology. *Curr Environ Health Rep.* sept 2015;2(3):236-49.
187. Miyazaki S, Hill C. General tissue reactions and implications for radiation protection. *Ann ICRP.* juin 2015;44(1_suppl):76-83.
188. Leuraud K, Richardson DB, Cardis E, Daniels RD, Gillies M, O'Hagan JA, et al. Ionising radiation and risk of death from leukaemia and lymphoma in radiation-monitored workers (INWORKS): an international cohort study. *Lancet Haematol.* juill 2015;2(7):e276-81.
189. Gérard JP. Risques professionnels liés aux rayonnements ionisants et surveillance des personnes exposées. *Rev Prat.* janv 2015;65:90-3.
190. Bouraoui S, Mougou S, Drira A, Tabka F, Bouali N, Mrizek N, et al. A cytogenetic approach to the effects of low levels of ionizing radiation (IR) on the exposed Tunisian hospital workers. *Int J Occup Med Environ Health [Internet].* 1 janv 2013 [cité 2 sept 2024];26(1). Disponible sur: <http://ijomeh.eu/A-cytogenetic-approach-to-the-effects-of-low-levels-of-ionizing-radiation-ir-on-the-exposed-tunisian-hospital-workers,2222,0,2.html>
191. Hammer GP, Scheidemann-Wesp U, Samkange-Zeeb F, Wicke H, Neriishi K, Blettner M. Occupational exposure to low doses of ionizing radiation and cataract development: a systematic literature review and perspectives on future studies. *Radiat Environ Biophys.* août 2013;52(3):303-19.
192. Stewart FA, Akleyev AV, Hauer-Jensen M, Hendry JH, Kleiman NJ, MacVittie TJ, et al. ICRP PUBLICATION 118: ICRP Statement on Tissue Reactions and Early and Late Effects of Radiation in Normal Tissues and Organs — Threshold Doses for Tissue Reactions in a Radiation Protection Context. Clement CH, éditeur. *Ann ICRP.* févr 2012;41(1-2):1-322.
193. Little MP, Gola A, Tzoulaki I. A Model of Cardiovascular Disease Giving a Plausible Mechanism for the Effect of Fractionated Low-Dose Ionizing Radiation Exposure. Richardson RB, éditeur. *PLoS Comput Biol.* 23 oct 2009;5(10):e1000539.
194. Matanoski GM, Tonascia JA, Correa-Villaseñor A, Yates KC, Fink N, Elliott E, et al. Cancer Risks and Low-Level Radiation in U. S. Shipyard Workers. *J Radiat Res (Tokyo).* 2008;49(1):83-91.
195. Gros H. Epidemiological surveillance at Electricite de France-Gaz de France: health assessment of nuclear power plant employees between 1993 and 1998. *Occup Med.* 1 févr 2002;52(1):35-44.

196. Wing S, Richardson D, Wolf S, Mihlan G, Crawford-Brown D, Wood J. A Case Control Study of Multiple Myeloma at Four Nuclear Facilities. *Ann Epidemiol.* avr 2000;10(3):144-53.

DÉCLARATION SUR L'HONNEUR

Université

de Strasbourg

Nom : SCHMITT

Prénom : Guillaume

Ayant été informé(e) qu'en m'appropriant tout ou partie d'une œuvre pour l'intégrer dans mon propre mémoire de spécialité ou dans mon mémoire de thèse de docteur en médecine, je me rendrais coupable d'un délit de contrefaçon au sens de l'article L335-1 et suivants du code de la propriété intellectuelle et que ce délit était constitutif d'une fraude pouvant donner lieu à des poursuites pénales conformément à la loi du 23 décembre 1901 dite de répression des fraudes dans les examens et concours publics, Ayant été avisé(e) que le président de l'université sera informé de cette tentative de fraude ou de plagiat, afin qu'il saisisse la juridiction disciplinaire compétente, Ayant été informé(e) qu'en cas de plagiat, la soutenance du mémoire de spécialité et/ou de la thèse de médecine sera alors automatiquement annulée, dans l'attente de la décision que prendra la juridiction disciplinaire de l'université j'atteste sur l'honneur Ne pas avoir reproduit dans mes documents tout ou partie d'œuvre(s) déjà existante(s), à l'exception de quelques brèves citations dans le texte, mises entre guillemets et référencées dans la bibliographie de mon mémoire.

A écrire à la main : « J'atteste sur l'honneur avoir connaissance des suites disciplinaires ou pénales que j'encours en cas de déclaration erronée ou incomplète ».

*J'atteste sur l'honneur avoir connaissance
des suites disciplinaires ou pénales que
j'encours en cas de déclaration erronée
ou incomplète.*

À ILLKIRCH-GRAFFENSTEDEN,

Le 11/03/2024

Signature originale :

SCHMITT Guillaume