

UNIVERSITE DE STRASBOURG
FACULTE DE MEDECINE DE STRASBOURG

ANNEE 2019

N° : 122

THESE
PRESENTEE POUR LE DIPLOME DE
DOCTEUR EN MEDECINE

Diplôme d'Etat
Mention D.E.S. Médecine du Travail

PAR

ERIC HOSSANN
Né le 08/04/1992 à Schiltigheim (Bas-Rhin, France)

SUIVI DOSIMETRIQUE LORS DE LA MANIPULATION DU PHOSPHORE 32
RADIOACTIF NON SCHELLE EN BIOLOGIE MOLECULAIRE :
ENQUETE AUTOUR D'UN « FAUX » SENTIMENT DE SECURITE

Présidente de thèse : Professeur Maria GONZALEZ

Directrice de thèse : Dr Simone MUNCH

Co-directrice de thèse : Dr Nathalie NOURRY



1
FACULTÉ DE MÉDECINE
(U.F.R. des Sciences Médicales)

Edition JUILLET 2019
Année universitaire 2018-2019

**HOPITAUX UNIVERSITAIRES
DE STRASBOURG (HUS)**
Directeur général :
M. GAUTIER Christophe

- **Président de l'Université** M. DENEKEN Michel
- **Doyen de la Faculté** M. SIBILIA Jean
- **Assesseur du Doyen (13.01.10 et 08.02.11)** M. GOICHOT Bernard
- **Doyens honoraires : (1976-1983)** M. DORNER Marc
- **(1983-1989)** M. MANTZ Jean-Marie
- **(1989-1994)** M. VINCENDON Guy
- **(1994-2001)** M. GERLINGER Pierre
- **(3.10.01-7.02.11)** M. LUDES Bertrand
- **Chargé de mission auprès du Doyen** M. VICENTE Gilbert
- **Responsable Administratif** M. BITSCH Samuel

A1 - PROFESSEUR TITULAIRE DU COLLEGE DE FRANCE

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

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

BAHRAM Séiamak Immunologie biologique (01.10.2013 au 31.09.2018)
DOLLFUS Hélène Génétique clinique (01.10.2014 au 31.09.2019)

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

PO191

NOM et Prénoms	CS*	Services Hospitaliers ou Institut / Localisation	Sous-section du Conseil National des Universités
ADAM Philippe P0001	NRP6 NCS	• Pôle de l'Appareil locomoteur - Service de chirurgie orthopédique et de Traumatologie / HP	50.02 Chirurgie orthopédique et traumatologique
AKLADIOS Cherif P0191	NRP6 CS	• Pôle de Gynécologie-Obstétrique - Service de Gynécologie-Obstétrique/ HP	54.03 Gynécologie-Obstétrique ; gynécologie médicale Option : Gynécologie-Obstétrique
ANDRES Emmanuel P0002	NRP6 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 P0003	NRP6 NCS	• Pôle Tête et Cou-CETD - Service de Neurologie / Hôpital de Hautepierre	49.01 Neurologie
ARNAUD Laurent P0188	NRP6 NCS	• Pôle MIRNED - Service de Rhumatologie / Hôpital de Hautepierre	50.01 Rhumatologie
BACHELLIER Philippe P0004	RP6 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 Séiamak P0005	NRP6 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)
BALDAUF Jean-Jacques P0006	NRP6 NCS	• Pôle de Gynécologie-Obstétrique - Service de Gynécologie-Obstétrique / Hôpital de Hautepierre	54.03 Gynécologie-Obstétrique ; gynécologie médicale Option : Gynécologie-Obstétrique
BAUMERT Thomas P0007	NRP6 CU	• Pôle Hépatogastro-digestif de l'Hôpital Civil - Unité d'Hépatologie - Service d'Hépatogastro-Entérologie / NHC	52.01 Gastro-entérologie ; hépatologie Option : hépatologie
Mme BEAU-FALLER Michèle M0007 / PO170	NRP6 NCS	• Pôle de Biologie - Laboratoire de Biochimie et de Biologie moléculaire / HP	44.03 Biologie cellulaire (option biologique)
BEAUJEU Remy P0008	NRP6 Resp	• Pôle d'Imagerie - CME / Activités transversales • Unité de Neuroradiologie interventionnelle / Hôpital de Hautepierre	43.02 Radiologie et imagerie médicale (option clinique)
BECMEUR François P0009	RP6 NCS	• Pôle médico-chirurgical de Pédiatrie - Service de Chirurgie Pédiatrique / Hôpital Hautepierre	54.02 Chirurgie infantile
BERNA Fabrice P0192	NRP6 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 P0013	NRP6 CS	• Pôle de Psychiatrie et de santé mentale - Service de Psychiatrie II / Hôpital Civil	49.03 Psychiatrie d'adultes
BIERRY Guillaume P0178	NRP6 NCS	• Pôle d'Imagerie - Service d'Imagerie II - Neuroradiologie-imagerie ostéoarticulaire-Pédiatrie / Hôpital Hautepierre	43.02 Radiologie et Imagerie médicale (option clinique)
BILBAULT Pascal P0014	NRP6 CS	• Pôle d'Urgences / Réanimations médicales / CAP - Service des Urgences médico-chirurgicales Adultes / Hôpital de Hautepierre	48.02 Réanimation ; Médecine d'urgence Option : médecine d'urgence
BODIN Frédéric P0187	NRP6 NCS	• Pôle de Chirurgie Maxillo-faciale, morphologie et Dermatologie - Service de Chirurgie maxillo-faciale et réparatrice / Hôpital Civil	50.04 Chirurgie Plastique, Reconstructrice et Esthétique ; Brûlologie
Mme BOEHM-BURGER Nelly P0016	NCS	• Institut d'Histologie / Faculté de Médecine	42.02 Histologie, Embryologie et Cytogénétique (option biologique)
BONNOMET François P0017	NRP6 CS	• Pôle de l'Appareil locomoteur - Service de Chirurgie orthopédique et de Traumatologie / HP	50.02 Chirurgie orthopédique et traumatologique
BOURCIER Tristan P0018	NRP6 NCS	• Pôle de Spécialités médicales-Ophthalmologie / SMO - Service d'Ophthalmologie / Nouvel Hôpital Civil	55.02 Ophthalmologie
BOURGIN Patrice P0020	NRP6 NCS	• Pôle Tête et Cou - CETD - Service de Neurologie / Hôpital Civil	49.01 Neurologie
Mme BRIGAND Cécile P0022	NRP6 NCS	• Pôle des Pathologies digestives, hépatiques et de la transplantation - Service de Chirurgie générale et Digestive / HP	53.02 Chirurgie générale
BRUANT-RODIER Catherine P0023	NRP6 CS	• Pôle de l'Appareil locomoteur - Service de Chirurgie Maxillo-faciale et réparatrice / Hôpital Civil	50.04 Option : chirurgie plastique, reconstructrice et esthétique

NHC = Nouvel Hôpital Civil HC = Hôpital Civil HP = Hôpital de Hautepierre PTM = Plateau technique de microbiologie

NOM et Prénoms	CS*	Services Hospitaliers ou Institut / Localisation	Sous-section du Conseil National des Universités
Mme CAILLARD-OHLMANN Sophie P0171	NRP6 NCS	• Pôle de Spécialités médicales-Ophthalmologie / SMO - Service de Néphrologie-Transplantation / NHC	52.03 Néphrologie
CANDOLFI Ermanno P0025	RP6 CS	• 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)
CASTELAIN Vincent P0027	NRP6 NCS	• Pôle Urgences - Réanimations médicales / Centre antipoison - Service de Réanimation médicale / Hôpital Hautepierre	48.02 Réanimation
CHAKFE Nabil P0029	NRP6 CS	• Pôle d'activité médico-chirurgicale Cardio-vasculaire - Service de Chirurgie Vasculaire et de transplantation rénale / NHC	51.04 Chirurgie vasculaire ; médecine vasculaire / Option : chirurgie vasculaire
CHARLES Yann-Philippe M0013 / P0172	NRP6 NCS	• Pôle de l'Appareil locomoteur - Service de Chirurgie du rachis / Chirurgie B / HC	50.02 Chirurgie orthopédique et traumatologique
Mme CHARLOUX Anne P0028	NRP6 NCS	• Pôle de Pathologie thoracique - Service de Physiologie et d'Explorations fonctionnelles / NHC	44.02 Physiologie (option biologique)
Mme CHARPIOT Anne P0030	NRP6 NCS	• Pôle Tête et Cou - CETD - Serv. d'Oto-rhino-laryngologie et de Chirurgie cervico-faciale / HP	55.01 Oto-rhino-laryngologie
CHELLY Jameleddine P0173	NRP6 CS	• Pôle de Biologie - Laboratoire de Diagnostic génétique / NHC	47.04 Génétique (option biologique)
Mme CHENARD-NEU Marie- Pierre P0041	NRP6 CS	• Pôle de Biologie - Service de Pathologie / Hôpital de Hautepierre	42.03 Anatomie et cytologie pathologiques (option biologique)
CLAVERT Philippe P0044	NRP6 CS	• Pôle de l'Appareil locomoteur - Service d'Orthopédie / CCOM d'Illkirch	42.01 Anatomie (option clinique, orthopédie traumatologique)
COLLANGE Olivier P0193	NRP6 NCS	• Pôle d'Anesthésie / Réanimations chirurgicales / SAMU-SMUR - Service d'Anesthésiologie-Réanimation Chirurgicale / NHC	48.01 Anesthésiologie-Réanimation ; Médecine d'urgence (option Anesthésiologie-Réanimation - Type clinique)
CRIBIER Bernard P0045	NRP6 CS	• Pôle d'Urologie, Morphologie et Dermatologie - Service de Dermatologie / Hôpital Civil	50.03 Dermato-Vénérologie
DANION Jean-Marie P0046	NRP6 NCS	• Pôle de Psychiatrie et de santé mentale - Service de Psychiatrie 1 / Hôpital Civil	49.03 Psychiatrie d'adultes
de BLAY de GAIX Frédéric P0048	RP6 CS	• Pôle de Pathologie thoracique - Service de Pneumologie / Nouvel Hôpital Civil	51.01 Pneumologie
DEBRY Christian P0049	NRP6 CS	• Pôle Tête et Cou - CETD - Serv. d'Oto-rhino-laryngologie et de Chirurgie cervico-faciale / HP	55.01 Oto-rhino-laryngologie
de SEZE Jérôme P0057	NRP6 NCS	• Pôle Tête et Cou - CETD - Service de Neurologie / Hôpital de Hautepierre	49.01 Neurologie
DERUELLE Philippe		• Pôle de Gynécologie-Obstétrique - Service de Gynécologie-Obstétrique / Hôpital de Hautepierre	54.03 Gynécologie-Obstétrique; gynécologie médicale: option gynécologie-obstétrique
DIEMUNSCH Pierre P0051	RP6 CS	• Pôle d'Anesthésie / Réanimations chirurgicales / SAMU-SMUR - Service d'Anesthésie-Réanimation Chirurgicale / Hôpital de Hautepierre	48.01 Anesthésiologie-réanimation (option clinique)
Mme DOLLFUS-WALTMANN Hélène P0054	NRP6 CS	• Pôle de Biologie - Service de Génétique Médicale / Hôpital de Hautepierre	47.04 Génétique (type clinique)
DUCLOS Bernard P0055	NRP6 CS	• Pôle des Pathologies digestives, hépatiques et de la transplantation - Service d'Hépatogastro-Entérologie et d'Assistance Nutritive / HP	52.01 Option : Gastro-entérologie
DUFOUR Patrick (5) (7) P0056	S/nb Cons	• Centre Régional de Lutte contre le cancer Paul Strauss (convention)	47.02 Option : Cancérologie clinique
EHLINGER Matthieu P0188	NRP6 NCS	• Pôle de l'Appareil Locomoteur - Service de Chirurgie Orthopédique et de Traumatologie/Hôpital de Hautepierre	50.02 Chirurgie Orthopédique et Traumatologique
Mme ENTZ-WERLE Natacha P0059	NRP6 NCS	• Pôle médico-chirurgical de Pédiatrie - Service de Pédiatrie III / Hôpital de Hautepierre	54.01 Pédiatrie
Mme FACCA Sybille P0179	NRP6 NCS	• Pôle de l'Appareil locomoteur - Service de la Main et des Nerfs périphériques / CCOM Illkirch	50.02 Chirurgie orthopédique et traumatologique
Mme FAFI-KREMER Samira P0060	NRP6 CS	• Pôle de Biologie - Laboratoire (Institut) de Virologie / PTM HUS et Faculté	45.01 Bactériologie-Virologie ; Hygiène Hospitalière Option Bactériologie-Virologie biologique
FALCOZ Pierre-Emmanuel P0052	NRP6 NCS	• Pôle de Pathologie thoracique - Service de Chirurgie Thoracique / Nouvel Hôpital Civil	51.03 Chirurgie thoracique et cardio-vasculaire
GANGI Afshin P0062	RP6 CS	• Pôle d'Imagerie - Service d'Imagerie A interventionnelle / Nouvel Hôpital Civil	43.02 Radiologie et imagerie médicale (option clinique)
GAUCHER David P0063	NRP6 NCS	• Pôle des Spécialités Médicales - Ophthalmologie / SMO - Service d'Ophthalmologie / Nouvel Hôpital Civil	55.02 Ophthalmologie
GENY Bernard P0064	NRP6 CS	• Pôle de Pathologie thoracique - Service de Physiologie et d'Explorations fonctionnelles / NHC	44.02 Physiologie (option biologique)
GEORG Yannick		• Pôle d'activité médico-chirurgicale Cardio-vasculaire - Service de Chirurgie Vasculaire et de transplantation rénale / NHC	51.04 Chirurgie vasculaire ; médecine vasculaire / Option : chirurgie vasculaire
GICQUEL Philippe P0065	NRP6 CS	• Pôle médico-chirurgical de Pédiatrie - Service de Chirurgie Pédiatrique / Hôpital Hautepierre	54.02 Chirurgie infantile
GOICHOT Bernard P0066	RP6 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 P0067	NRP6 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 Travail

NOM et Prénoms	CS*	Services Hospitaliers ou Institut / Localisation	Sous-section du Conseil National des Universités
GOTTENBERG Jacques-Eric P0068	NRP6 CS	• Pôle de Médecine Interne, Rhumatologie, Nutrition, Endocrinologie, Diabétologie (MIRNED) - Service de Rhumatologie / Hôpital Hautepierre	50.01 Rhumatologie
HANNEDOUCHE Thierry P0071	NRP6 CS	• Pôle de Spécialités médicales - Ophtalmologie / SMO - Service de Néphrologie - Dialyse / Nouvel Hôpital Civil	52.03 Néphrologie
HANSMANN Yves P0072	NRP6 CS	• Pôle de Spécialités médicales - Ophtalmologie / SMO - Service des Maladies infectieuses et tropicales / Nouvel Hôpital Civil	45.03 Option : Maladies infectieuses
HERBRECHT Raoul P0074	RP6 NCS	• Pôle d'Oncolo-Hématologie - Service d'hématologie et d'Oncologie / Hôp. Hautepierre	47.01 Hématologie ; Transfusion
HIRSCH Edouard P0075	NRP6 NCS	• Pôle Tête et Cou - CETD - Service de Neurologie / Hôpital de Hautepierre	49.01 Neurologie
IMPERIALE Alessio P0194	NRP6 NCS	• Pôle d'Imagerie - Service de Biophysique et de Médecine nucléaire/Hôpital de Hautepierre	43.01 Biophysique et médecine nucléaire
ISNER-HOROBETI Marie-Eve P0189		• Pôle de Médecine Physique et de Réadaptation - Institut Universitaire de Réadaptation / Clémenceau	49.05 Médecine Physique et Réadaptation
JAULHAC Benoît P0078	NRP6 CS	• Pôle de Biologie - Institut (Laboratoire) de Bactériologie / PTM HUS et Faculté de Méd.	45.01 Option : Bactériologie -virologie (biologique)
Mme JEANDIDIER Nathalie P0079	NRP6 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		• Pôle d'activité médico-chirurgicale Cardio-vasculaire - Service de Cardiologie / Nouvel Hôpital Civil	51.02 Cardiologie
KALTENBACH Georges P0081	RP6 CS	• Pôle de Gériatrie - Service de Médecine Interne - Gériatrie / Hôpital de la Robertsau	53.01 Option : gériatrie et biologie du vieillissement
KEMPF Jean-François P0083	RP6 CS	• Pôle de l'Appareil locomoteur - Centre de Chirurgie Orthopédique et de la Main-CCOM / Illkirch	50.02 Chirurgie orthopédique et traumatologique
Mme KESSLER Laurence P0084	NRP6 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 P0085	NRP6 NCS	• Pôle de Pathologie thoracique - Service de Pneumologie / Nouvel Hôpital Civil	51.01 Pneumologie
KINDO Michel P0195	NRP6 NCS	• Pôle d'activité médico-chirurgicale Cardio-vasculaire - Service de Chirurgie Cardio-vasculaire / Nouvel Hôpital Civil	51.03 Chirurgie thoracique et cardio-vasculaire
KOPFERSCHMITT Jacques P0086	NRP6 NCS	• Pôle Urgences - Réanimations médicales / Centre antipoison - Service d'Urgences médico-chirurgicales adultes/Nouvel Hôpital Civil	48.04 Thérapeutique (option clinique)
Mme KORGANOW Anne-Sophie P0087	NRP6 CS	• Pôle de Spécialités médicales - Ophtalmologie / SMO - Service de Médecine Interne et d'Immunologie Clinique / NHC	47.03 Immunologie (option clinique)
KREMER Stéphane M0038 / P0174	NRP6 CS	• Pôle d'Imagerie - Service Imagerie 2 - Neuroradio Ostéoarticulaire - Pédiatrie / HP	43.02 Radiologie et imagerie médicale (option clinique)
KUHN Pierre P0175	NRP6 NCS	• Pôle médico-chirurgical de Pédiatrie - Service de Néonatalogie et Réanimation néonatale (Pédiatrie II) / Hôpital de Hautepierre	54.01 Pédiatrie
KURTZ Jean-Emmanuel P0089	NRP6 CS	• Pôle d'Onco-Hématologie - Service d'hématologie et d'Oncologie / Hôpital Hautepierre	47.02 Option : Cancérologie (clinique)
Mme LALANNE-TONGIO Laurence		• Pôle de Psychiatrie et de santé mentale - Service de Psychiatrie I / Hôpital Civil	49.03 Psychiatrie d'adultes
LANG Hervé P0090	NRP6 NCS	• Pôle de Chirurgie plastique reconstructrice et esthétique, Chirurgie maxillo-faciale, Morphologie et Dermatologie - Service de Chirurgie Urologique / Nouvel Hôpital Civil	52.04 Urologie
LANGER Bruno P0091	RP6 NCS	• Pôle de Gynécologie-Obstétrique - Service de Gynécologie-Obstétrique / Hôpital de Hautepierre	54.03 Gynécologie-Obstétrique : gynécologie médicale : option gynécologie-Obstétrique
LAUGEL Vincent P0092	NRP6 CS	• Pôle médico-chirurgical de Pédiatrie - Service de Pédiatrie 1 / Hôpital Hautepierre	54.01 Pédiatrie
LE MINOR Jean-Marie P0190	NRP6 NCS	• Pôle d'Imagerie - Institut d'Anatomie Normale / Faculté de Médecine - Service de Neuroradiologie, d'imagerie Ostéoarticulaire et interventionnelle/ Hôpital de Hautepierre	42.01 Anatomie
LIPSKER Dan P0093	NRP6 NCS	• Pôle de Chirurgie plastique reconstructrice et esthétique, Chirurgie maxillo-faciale, Morphologie et Dermatologie - Service de Dermatologie / Hôpital Civil	50.03 Dermato-vénéréologie
LIVERNEAUX Philippe P0094	NRP6 CS	• Pôle de l'Appareil locomoteur - Service de Chirurgie de la main - CCOM / Illkirch	50.02 Chirurgie orthopédique et traumatologique
MALOUF GABRIEL		• Pôle d'Onco-hématologie - Service d'Hématologie et d'Oncologie / Hôpital de Hautepierre	47.01 Hématologie: transfusion
MARESCAUX Christian (5) P0097	NRP6 NCS	• Pôle Tête et Cou - CETD - Service de Neurologie / Hôpital de Hautepierre	49.01 Neurologie
MARK Manuel P0098	NRP6 NCS	• Pôle de Biologie - Laboratoire de Cytogénétique, Cytologie et Histologie quantitative / Hôpital de Hautepierre	54.05 Biologie et médecine du développement et de la reproduction (option biologique)
MARTIN Thierry P0099	NRP6 NCS	• Pôle de Spécialités médicales - Ophtalmologie / SMO - Service de Médecine Interne et d'Immunologie Clinique / NHC	47.03 Immunologie (option clinique)

NOM et Prénoms	CS*	Services Hospitaliers ou Institut / Localisation	Sous-section du Conseil National des Universités	
MASSARD Gilbert P0100	NRP6 NCS	• Pôle de Pathologie thoracique - Service de Chirurgie Thoracique / Nouvel Hôpital Civil	51.03	Chirurgie thoracique et cardio-vasculaire
Mme MATHELIN Carole P0101	NRP6 NCS	• Pôle de Gynécologie-Obstétrique - Unité de Sénologie - Hôpital Civil	54.03	Gynécologie-Obstétrique ; Gynécologie Médicale
MAUVIEUX Laurent P0102	NRP6 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
MAZZUCOTELLI Jean-Philippe P0103	RP6 CS	• Pôle d'activité médico-chirurgicale Cardio-vasculaire - Service de Chirurgie Cardio-vasculaire / Nouvel Hôpital Civil	51.03	Chirurgie thoracique et cardio-vasculaire
MERTES Paul-Michel P0104	NRP6 CS	• Pôle d'Anesthésiologie / Réanimations chirurgicales / SAMU-SMUR - Service d'Anesthésiologie-Réanimation chirurgicale / Nouvel Hôpital Civil	48.01	Option : Anesthésiologie-Réanimation (type mixte)
MEYER Nicolas P0105	NRP6 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 P0106	NRP6 NCS	• Pôle Urgences - Réanimations médicales / Centre antipoison - Service de Réanimation Médicale / Nouvel Hôpital Civil	48.02	Réanimation
MONASSIER Laurent P0107	NRP6 CS	• Pôle de Pharmacie-pharmacologie - Unité de Pharmacologie clinique / Nouvel Hôpital Civil	48.03	Option : Pharmacologie fondamentale
MOREL Olivier P0108	NRP6 NCS	• Pôle d'activité médico-chirurgicale Cardio-vasculaire - Service de Cardiologie / Nouvel Hôpital Civil	51.02	Cardiologie
MOULIN Bruno P0109	NRP6 CS	• Pôle de Spécialités médicales - Ophtalmologie / SMO - Service de Néphrologie - Transplantation / Nouvel Hôpital Civil	52.03	Néphrologie
MUTTER Didier P0111	RP6 CS	• Pôle Hépato-digestif de l'Hôpital Civil - Service de Chirurgie Digestive / NHC	52.02	Chirurgie digestive
NAMER Izzie Jacques P0112	NRP6 CS	• Pôle d'Imagerie - Service de Biophysique et de Médecine nucléaire / Hautepierre / NHC	43.01	Biophysique et médecine nucléaire
NISAND Israël P0113	NRP6 NCS	• Pôle de Gynécologie-Obstétrique - Service de Gynécologie Obstétrique / Hôpital de Hautepierre	54.03	Gynécologie-Obstétrique ; gynécologie médicale : option gynécologie-Obstétrique
NOEL Georges P0114	NCS	• Centre Régional de Lutte Contre le Cancer Paul Strauss (par convention) - Département de radiothérapie	47.02	Cancérologie ; Radiothérapie Option Radiothérapie biologique
OHLMANN Patrick P0115	NRP6 CS	• Pôle d'activité médico-chirurgicale Cardio-vasculaire - Service de Cardiologie / Nouvel Hôpital Civil	51.02	Cardiologie
Mme OLLAND Anne		• Pôle d'activité médico-chirurgicale Cardio-vasculaire - Service de Chirurgie thoracique / Nouvel Hôpital Civil	51.03	Chirurgie thoracique et cardio-vasculaire
Mme PAILLARD Catherine P0180	NRP6 CS	• Pôle médico-chirurgicale de Pédiatrie - Service de Pédiatrie III / Hôpital de Hautepierre	54.01	Pédiatrie
PELACCIA Thierry		• Pôle d'Anesthésie / Réanimation chirurgicales / SAMU-SMUR - Service SAMU/SMUR	48.02	Réanimation et anesthésiologie Option : Médecine d'urgences
Mme PERRETTA Silvana P0117	NRP6 NCS	• Pôle Hépato-digestif de l'Hôpital Civil - Service d'Urgence, de Chirurgie Générale et Endocrinienne / NHC	52.02	Chirurgie digestive
PESSAUX Patrick P0118	NRP6 NCS	• Pôle des Pathologies digestives, hépatiques et de la transplantation - Service d'Urgence, de Chirurgie Générale et Endocrinienne / NHC	53.02	Chirurgie Générale
PETIT Thierry P0119	CDp	• Centre Régional de Lutte Contre le Cancer - Paul Strauss (par convention) - Département de médecine oncologique	47.02	Cancérologie ; Radiothérapie Option : Cancérologie Clinique
PIVOT Xavier		• Centre Régional de Lutte Contre le Cancer - Paul Strauss (par convention) - Département de médecine oncologique	47.02	Cancérologie ; Radiothérapie Option : Cancérologie Clinique
POTTECHER Julien P0181	NRP6 NCS	• Pôle d'Anesthésie / Réanimations chirurgicales / SAMU-SMUR - Service d'Anesthésie et de Réanimation Chirurgicale / Hôpital de Hautepierre	48.01	Anesthésiologie-réanimation ; Médecine d'urgence (option clinique)
PRADIGNAC Alain P0123	NRP6 NCS	• Pôle de Médecine Interne, Rhumatologie, Nutrition, Endocrinologie, Diabétologie (MIRNED) - Service de Médecine interne et nutrition / HP	44.04	Nutrition
PROUST François P0182	NRP6 CS	• Pôle Tête et Cou - Service de Neurochirurgie / Hôpital de Hautepierre	49.02	Neurochirurgie
Mme QUOIX Elisabeth P0124	NRP6 CS	• Pôle de Pathologie thoracique - Service de Pneumologie / Nouvel Hôpital Civil	51.01	Pneumologie
Pr RAUL Jean-Sébastien P0125	NRP6 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 P0126	NRP6 NCS	• Pôle des Pathologies digestives, hépatiques et de la transplantation - Service d'Hépto-Gastro-Entérologie et d'Assistance Nutritive / HP	52.01	Option : Gastro-entérologie
Pr RICCI Roméo P0127	NRP6 NCS	• Pôle de Biologie - Laboratoire de Biochimie et de Biologie moléculaire / HP	44.01	Biochimie et biologie moléculaire
ROHR Serge P0128	NRP6 CS	• Pôle des Pathologies digestives, hépatiques et de la transplantation - Service de Chirurgie générale et Digestive / HP	53.02	Chirurgie générale
Mme ROSSIGNOL -BERNARD Sylvie P0196	NRP6 CS	• Pôle médico-chirurgical de Pédiatrie - Service de Pédiatrie I / Hôpital de Hautepierre	54.01	Pédiatrie

NOM et Prénoms	CS*	Services Hospitaliers ou Institut / Localisation	Sous-section du Conseil National des Universités	
ROUL Gérard P0129	NRP6 NCS	• Pôle d'activité médico-chirurgicale Cardio-vasculaire - Service de Cardiologie / Nouvel Hôpital Civil	51.02	Cardiologie
Mme ROY Catherine P0140	NRP6 CS	• Pôle d'Imagerie - Serv. d'Imagerie B - Imagerie viscérale et cardio-vasculaire / NHC	43.02	Radiologie et imagerie médicale (opt clinique)
SAUDER Philippe P0142	NRP6 CS	• Pôle Urgences - Réanimations médicales / Centre antipoison - Service de Réanimation médicale / Nouvel Hôpital Civil	48.02	Réanimation
SAUER Arnaud P0183	NRP6 NCS	• Pôle de Spécialités médicales - Ophtalmologie / SMO - Service d'Ophtalmologie / Nouvel Hôpital Civil	55.02	Ophtalmologie
SAULEAU Erik-André P0184	NRP6 NCS	• Pôle de Santé publique et Santé au travail - Laboratoire de Biostatistiques / Hôpital Civil • Biostatistiques et Informatique / Faculté de médecine / HC	46.04	Biostatistiques, Informatique médicale et Technologies de Communication (option biologique)
SAUSSINE Christian P0143	RP6 CS	• Pôle d'Urologie, Morphologie et Dermatologie - Service de Chirurgie Urologique / Nouvel Hôpital Civil	52.04	Urologie
SCHNEIDER Francis P0144	RP6 CS	• Pôle Urgences - Réanimations médicales / Centre antipoison - Service de Réanimation médicale / Hôpital de Haute-pierre	48.02	Réanimation
Mme SCHRÖDER Carmen P0185	NRP6 CS	• Pôle de Psychiatrie et de santé mentale - Service de Psychothérapie pour Enfants et Adolescents / Hôpital Civil	49.04	Pédopsychiatrie ; Addictologie
SCHULTZ Philippe P0145	NRP6 NCS	• Pôle Tête et Cou - CETD - Serv. d'Oto-rhino-laryngologie et de Chirurgie cervico-faciale / HP	55.01	Oto-rhino-laryngologie
SERFATY Lawrence P0197	NRP6 NCS	• Pôle des Pathologies digestives, hépatiques et de la transplantation - Service d'Hépto-Gastro-Entérologie et d'Assistance Nutritive / HP	52.01	Gastro-entérologie ; Hépatologie ; Addictologie Option : Hépatologie
SIBILIA Jean P0146	NRP6 NCS	• Pôle de Médecine Interne, Rhumatologie, Nutrition, Endocrinologie, Diabétologie (MIRNED) - Service de Rhumatologie / Hôpital Haute-pierre	50.01	Rhumatologie
Mme SPEEG-SCHATZ Claude P0147	RP6 CS	• Pôle de Spécialités médicales - Ophtalmologie / SMO - Service d'Ophtalmologie / Nouvel Hôpital Civil	55.02	Ophtalmologie
STEIB Jean-Paul P0149	NRP6 CS	• Pôle de l'Appareil locomoteur - Service de Chirurgie du rachis / Hôpital Civil	50.02	Chirurgie orthopédique et traumatologique
STEPHAN Dominique P0150	NRP6 CS	• Pôle d'activité médico-chirurgicale Cardio-vasculaire - Service des Maladies vasculaires - HTA - Pharmacologie clinique / Nouvel Hôpital Civil	51.04	Option : Médecine vasculaire
THAVEAU Fabien P0152	NRP6 NCS	• Pôle d'activité médico-chirurgicale Cardio-vasculaire - Service de Chirurgie vasculaire et de transplantation rénale / NHC	51.04	Option : Chirurgie vasculaire
Mme TRANCHANT Christine P0153	NRP6 CS	• Pôle Tête et Cou - CETD - Service de Neurologie / Hôpital de Haute-pierre	49.01	Neurologie
VEILLON Francis P0155	NRP6 CS	• Pôle d'Imagerie - Service d'Imagerie 1 - Imagerie viscérale, ORL et mammaire / Hôpital Haute-pierre	43.02	Radiologie et imagerie médicale (option clinique)
VELTEN Michel P0156	NRP6 NCS CS	• 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 / Fac de Médecine • Centre de Lutte contre le Cancer Paul Strauss - Serv. Epidémiologie et de biostatistiques	46.01	Epidémiologie, économie de la santé et prévention (option biologique)
VETTER Denis P0157	NRP6 NCS	• Pôle de Médecine Interne, Rhumatologie, Nutrition, Endocrinologie, Diabétologie (MIRNED) - Service de Médecine Interne, Diabète et Maladies métaboliques/HC	52.01	Option : Gastro-entérologie
VIDAILHET Pierre P0158	NRP6 NCS	• Pôle de Psychiatrie et de santé mentale - Service de Psychiatrie I / Hôpital Civil	49.03	Psychiatrie d'adultes
VIVILLE Stéphane P0159	NRP6 NCS	• Pôle de Biologie - Laboratoire de Parasitologie et de Pathologies tropicales / Fac. de Médecine	54.05	Biologie et médecine du développement et de la reproduction (option biologique)
VOGEL Thomas P0160	NRP6 CS	• Pôle de Gériatrie - Service de soins de suite et réadaptations gériatriques / Hôpital de la Robertsau	51.01	Option : Gériatrie et biologie du vieillissement
WEBER Jean-Christophe Pierre P0162	NRP6 CS	• Pôle de Spécialités médicales - Ophtalmologie / SMO - Service de Médecine Interne / Nouvel Hôpital Civil	53.01	Option : Médecine Interne
WOLF Philippe P0164	NRP6 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		• Pôle Tête et Cou - Service de Neurochirurgie / Hôpital de Haute-pierre	49.01	Neurologie

NOM et Prénoms	CS*	Services Hospitaliers ou Institut / Localisation	Sous-section du Conseil National des Universités
HC : Hôpital Civil - HP : Hôpital de Haute-pierre - NHC : Nouvel Hôpital Civil * : 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 (1) En surnombre universitaire jusqu'au 31.08.2018 (7) Consultant hospitalier (pour un an) éventuellement renouvelable --> 31.08.2017 (3) (8) Consultant hospitalier (pour une 2ème année) --> 31.08.2017 (5) En surnombre universitaire jusqu'au 31.08.2019 (9) Consultant hospitalier (pour une 3ème année) --> 31.08.2017 (6) En surnombre universitaire jusqu'au 31.08.2017			

A4 - PROFESSEUR ASSOCIE DES UNIVERSITES

HABERSETZER François	CS	Pôle Hépato-digestif 4190 Service de Gastro-Entérologie - NHC	52.01 Gastro-Entérologie
CALVEL Laurent	NRPô CS	Pôle Spécialités médicales - Ophtalmologie / SMO Service de Soins palliatifs / NHC	55.02 Ophtalmologie
SALVAT Eric		Centre d'Evaluation et de Traitement de la Douleur	

MO112	B1 - MAITRES DE CONFERENCES DES UNIVERSITES - PRATICIENS HOSPITALIERS (MCU-PH)		
-------	---	--	--

NOM et Prénoms	CS*	Services Hospitaliers ou Institut / Localisation	Sous-section du Conseil National des Universités	
AGIN Arnaud M0001		• Pôle d'Imagerie - Service de Biophysique et de Médecine nucléaire/Hôpital de Hautepierre	43.01	Biophysique et Médecine nucléaire
Mme ANTAL Maria Cristina M0003		• Pôle de Biologie - Service de Pathologie / Hautepierre • Faculté de Médecine / Institut d'Histologie	42.02	Histologie, Embryologie et Cytogénétique (option biologique)
Mme ANTONI Delphine M0109		• Centre de lutte contre le cancer Paul Strauss	47.02	Cancérologie ; Radiothérapie
ARGEMI Xavier M0112		• Pôle de Spécialités médicales - Ophtalmologie / SMO - Service des Maladies infectieuses et tropicales / Nouvel Hôpital Civil	45.03	Maladies infectieuses ; Maladies tropicales Option : Maladies infectieuses
Mme AYME-DIETRICH Estelle		• Pôle de Pharmacologie - Unité de Pharmacologie clinique / NHC	48.03	Option: pharmacologie fondamentale
Mme BARNIG Cindy M0110		• Pôle de Pathologie thoracique - Service de Physiologie et d'Explorations Fonctionnelles / NHC	44.02	Physiologie
Mme BIANCALANA Valérie M0008		• Pôle de Biologie - Laboratoire de Diagnostic Génétique / Nouvel Hôpital Civil	47.04	Génétique (option biologique)
BLONDET Cyrille M0091		• Pôle d'Imagerie - Service de Biophysique et de Médecine nucléaire/Hôpital de Hautepierre	43.01	Biophysique et médecine nucléaire
BONNEMAINS Laurent M0099		• Pôle d'activité médico-chirurgicale Cardio-vasculaire - Service de Chirurgie cardio-vasculaire / Nouvel Hôpital Civil	54.01	Pédiatrie
BOUSIGES Olivier M0092		• Pôle de Biologie - Laboratoire de Biochimie et de Biologie moléculaire / HP	44.01	Biochimie et biologie moléculaire
CARAPITO Raphaël M0113		• 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 M0012		• Pôle d'Oncologie et d'Hématologie - Service d'Oncologie et d'Hématologie / HP	47.02	Cancérologie ; Radiothérapie (option biologique)
CHOQUET Philippe M0014		• Pôle d'Imagerie - Service de Biophysique et de Médecine nucléaire / HP	43.01	Biophysique et médecine nucléaire
COLLONGUES Nicolas M0016		• Pôle Tête et Cou-CETD - Centre d'Investigation Clinique / NHC et HP	49.01	Neurologie
DALI-YOUCHEF Ahmed Nassim M0017		• Pôle de Biologie - Laboratoire de Biochimie et Biologie moléculaire / NHC	44.01	Biochimie et biologie moléculaire
Mme de MARTINO Sylvie M0018		• Pôle de Biologie - Laboratoire de Bactériologie / PTM HUS et Faculté de Médecine	45.01	Bactériologie-virologie Option bactériologie-virologie biologique
Mme DEPIENNE Christel M0100 (Dispo->15.08.18)	CS	• Pôle de Biologie - Laboratoire de Cytogénétique / HP	47.04	Génétique
DEVYS Didier M0019		• Pôle de Biologie - Laboratoire de Diagnostic génétique / Nouvel Hôpital Civil	47.04	Génétique (option biologique)
DOLLÉ Pascal M0021		• Pôle de Biologie -Laboratoire de Biochimie et biologie moléculaire / NHC	44.01	Biochimie et biologie moléculaire
Mme ENACHE Irina M0024		• Pôle de Pathologie thoracique - Service de Physiologie et d'Explorations fonctionnelles / NHC	44.02	Physiologie
FILISSETTI Denis M0025		• Pôle de Biologie - Labo. de Parasitologie et de Mycologie médicale / PTM HUS et Faculté	45.02	Parasitologie et mycologie (option biologique)
FOUCHER Jack M0027		• Institut de Physiologie / Faculté de Médecine • Pôle de Psychiatrie et de santé mentale - Service de Psychiatrie I / Hôpital Civil	44.02	Physiologie (option clinique)
GUERIN Eric M0032		• Pôle de Biologie - Laboratoire de Biochimie et de Biologie moléculaire / HP	44.03	Biologie cellulaire (option biologique)
Mme HARSAN-RASTEI Laura		• Pôle d'Imagerie - Service de Biophysique et de Médecine nucléaire/Hôpital de Hautepierre	43.01	Biophysique et médecine nucléaire
Mme HEIMBURGER Céline		• Pôle d'Imagerie - Service de Biophysique et de Médecine nucléaire/Hôpital de Hautepierre	43.01	Biophysique et médecine nucléaire
Mme HELMS Julie M0114		• Pôle d'Urgences / Réanimations médicales / CAP - Service de Réanimation médicale / Nouvel Hôpital Civil	48.02	Réanimation ; Médecine d'urgence Option : Réanimation
HUBELE Fabrice M0033		• Pôle d'Imagerie - Service de Biophysique et de Médecine nucléaire / HP et NHC	43.01	Biophysique et médecine nucléaire
Mme JACAMON-FARRUGIA Audrey M0034		• 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
JEGU Jérémie M0101		• Pôle de Santé publique et Santé au travail - Service de Santé Publique / Hôpital Civil	46.01	Epidémiologie, Economie de la santé et Prévention (option biologique)
JEHL François M0035		• Pôle de Biologie - Institut (Laboratoire) de Bactériologie / PTM HUS et Faculté	45.01	Option : Bactériologie -virologie (biologique)

NOM et Prénoms	CS*	Services Hospitaliers ou Institut / Localisation	Sous-section du Conseil National des Universités	
KASTNER Philippe M0089		• Pôle de Biologie - Laboratoire de diagnostic génétique / Nouvel Hôpital Civil	47.04	Génétique (option biologique)
Mme KEMMEL Véronique M0036		• Pôle de Biologie - Laboratoire de Biochimie et de Biologie moléculaire / HP	44.01	Biochimie et biologie moléculaire
Mme LAMOUR Valérie M0040		• Pôle de Biologie - Laboratoire de Biochimie et de Biologie moléculaire / HP	44.01	Biochimie et biologie moléculaire
Mme LANNES Béatrice M0041		• Institut d'Histologie / Faculté de Médecine • Pôle de Biologie - Service de Pathologie / Hôpital de Hautepierre	42.02	Histologie, Embryologie et Cytogénétique (option biologique)
LAVAUUX Thomas M0042		• Pôle de Biologie - Laboratoire de Biochimie et de Biologie moléculaire / HP	44.03	Biologie cellulaire
LAVIGNE Thierry M0043	CS	• Pôle de Santé Publique et Santé au travail - Service d'Hygiène hospitalière et de médecine préventive / PTM et HUS - Equipe opérationnelle d'Hygiène	46.01	Epidémiologie, économie de la santé et prévention (option biologique)
Mme LEJAY Anne M0102		• Pôle de Pathologie thoracique - Service de Physiologie et d'Explorations fonctionnelles / NHC	44.02	Physiologie (Biologique)
LENORMAND Cédric M0103		• Pôle de Chirurgie maxillo-faciale, Morphologie et Dermatologie - Service de Dermatologie / Hôpital Civil	50.03	Dermato-Vénérologie
LEPILLER Quentin M0104 (Dispo → 31.08.2018)		• Pôle de Biologie - Laboratoire de Virologie / PTM HUS et Faculté de Médecine	45.01	Bactériologie-Virologie ; Hygiène hospitalière (Biologique)
Mme LETSCHER-BRU Valérie M0045		• 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)
LHERMITTE Benoît M0115		• Pôle de Biologie - Service de Pathologie / Hôpital de Hautepierre	42.03	Anatomie et cytologie pathologiques
Mme LONSDORFER-WOLF Evelyne M0090		• Institut de Physiologie Appliquée - Faculté de Médecine • Pôle de Pathologie thoracique - Service de Physiologie et d'Explorations fonctionnelles / NHC	44.02	Physiologie
LUTZ Jean-Christophe M0046		• Pôle de Chirurgie plastique reconstructrice et esthétique, Chirurgie maxillo-faciale, Morphologie et Dermatologie - Serv. de Chirurgie Maxillo-faciale, plastique reconstructrice et esthétique/HC	55.03	Chirurgie maxillo-faciale et stomatologie
MEYER Alain M0093		• Institut de Physiologie / Faculté de Médecine • Pôle de Pathologie thoracique - Service de Physiologie et d'Explorations fonctionnelles / NHC	44.02	Physiologie (option biologique)
MIGUET Laurent M0047		• Pôle de Biologie - Laboratoire d'Hématologie biologique / Hôpital de Hautepierre et NHC	44.03	Biologie cellulaire (type mixte : biologique)
Mme MOUTOU Céline ép. GUNTNER M0049	CS	• Pôle de Biologie - Laboratoire de Diagnostic préimplantatoire / CMCO Schiltigheim	54.05	Biologie et médecine du développement et de la reproduction (option biologique)
MULLER Jean M0050		• Pôle de Biologie - Laboratoire de Diagnostic génétique / Nouvel Hôpital Civil	47.04	Génétique (option biologique)
NOLL Eric M0111		• Pôle d'Anesthésie Réanimation Chirurgicale SAMU-SMUR - Service Anesthésiologie et de Réanimation Chirurgicale - Hôpital Hautepierre	48.01	Anesthésiologie-Réanimation ; Médecine d'urgence
Mme NOURRY Nathalie M0011		• 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)
PENCREAC'H Erwan M0052		• Pôle de Biologie - Laboratoire de Biochimie et biologie moléculaire / Nouvel Hôpital Civil	44.01	Biochimie et biologie moléculaire
PFAFF Alexander M0053		• Pôle de Biologie - Laboratoire de Parasitologie et de Mycologie médicale / PTM HUS	45.02	Parasitologie et mycologie
Mme PITON Amélie M0094		• Pôle de Biologie - Laboratoire de Diagnostic génétique / NHC	47.04	Génétique (option biologique)
PREVOST Gilles M0057		• Pôle de Biologie - Institut (Laboratoire) de Bactériologie / PTM HUS et Faculté	45.01	Option : Bactériologie -virologie (biologique)
Mme RADOSAVLJEVIC Mirjana M0058		• Pôle de Biologie - Laboratoire d'Immunologie biologique / Nouvel Hôpital Civil	47.03	Immunologie (option biologique)
Mme REIX Nathalie M0095		• Pôle de Biologie - Labo. d'Explorations fonctionnelles par les isotopes / NHC • Institut de Physique biologique / Faculté de Médecine	43.01	Biophysique et médecine nucléaire
RIEGEL Philippe M0059		• Pôle de Biologie - Institut (Laboratoire) de Bactériologie / PTM HUS et Faculté	45.01	Option : Bactériologie -virologie (biologique)
ROGUE Patrick (cf. A2) M0060		• Pôle de Biologie - Laboratoire de Biochimie et biologie moléculaire / NHC	44.01	Biochimie et biologie moléculaire (option biologique)
Mme ROLLAND Delphine		• Pôle de Biologie - Laboratoire d'Hématologie biologique / NHC	44.03	Biologie cellulaire (type mixte : biologique)
ROMAIN Benoît M0061		• Pôle des Pathologies digestives, hépatiques et de la transplantation - Service de Chirurgie générale et Digestive / HP	53.02	Chirurgie générale
Mme RUPPERT Elisabeth M0106		• Pôle Tête et Cou - Service de Neurologie - Unité de Pathologie du Sommeil / Hôpital Civil	49.01	Neurologie
Mme SABOU Alina M0096		• 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)

NOM et Prénoms	CS*	Services Hospitaliers ou Institut / Localisation	Sous-section du Conseil National des Universités
Mme SAMAMA Brigitte M0062		• Institut d'Histologie / Faculté de Médecine	42.02 Histologie, Embryologie et Cytogénétique (option biologique)
Mme SCHEIDECKER Sophie		• Pôle de Biologie - Laboratoire de Diagnostic génétique / Nouvel Hôpital Civil	47.04 Génétique (option biologique)
Mme SCHNEIDER Anne M0107		• Pôle médico-chirurgical de Pédiatrie - Service de Chirurgie pédiatrique / Hôpital de Hautepierre	54.02 Chirurgie Infantile
SCHRAMM Frédéric M0068		• 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 Diagnostic Génétique / Nouvel Hôpital Civil	47.04 Génétique (option biologique)
Mme SORDET Christelle M0069		• Pôle de Médecine Interne, Rhumatologie, Nutrition, Endocrinologie, Diabétologie (MIRNED) - Service de Rhumatologie / Hôpital de Hautepierre	50.01 Rhumatologie
TALHA Samy M0070		• Pôle de Pathologie thoracique - Service de Physiologie et explorations fonctionnelles / NHC	44.02 Physiologie (option clinique)
Mme TALON Isabelle M0039		• Pôle médico-chirurgical de Pédiatrie - Service de Chirurgie Infantile / Hôpital Hautepierre	54.02 Chirurgie infantile
TELETIN Marius M0071		• 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 URING-LAMBERT Béatrice M0073		• Institut d'Immunologie / HC • Pôle de Biologie - Laboratoire d'Immunologie biologique / Nouvel Hôpital Civil	47.03 Immunologie (option biologique)
VALLAT Laurent M0074		• Pôle de Biologie - Laboratoire d'Hématologie Biologique - Hôpital de Hautepierre	47.01 Hématologie ; Transfusion Option Hématologie Biologique
Mme VILLARD Odile M0076		• Pôle de Biologie - Labo. de Parasitologie et de Mycologie médicale / PTM HUS et Fac	45.02 Parasitologie et mycologie (option biologique)
Mme WOLF Michèle M0010		• Chargé de mission - Administration générale - Direction de la Qualité / Hôpital Civil	48.03 Option : Pharmacologie fondamentale
Mme ZALOSZYC Ariane ép. MARCANTONI M0116		• Pôle Médico-Chirurgical de Pédiatrie - Service de Pédiatrie I / Hôpital de Hautepierre	54.01 Pédiatrie
ZOLL Jeffrey M0077		• Pôle de Pathologie thoracique - Service de Physiologie et d'Explorations fonctionnelles / HC	44.02 Physiologie (option clinique)

B2 - PROFESSEURS DES UNIVERSITES (monoappartenant)

Pr BONAHE Christian	P0166	Département d'Histoire de la Médecine / Faculté de Médecine	72. Epistémologie - Histoire des sciences et des techniques
Mme la Pre RASMUSSEN Anne	P0186	Département d'Histoire de la Médecine / Faculté de Médecine	72. Epistémologie - Histoire des Sciences et des techniques

B3 - MAITRES DE CONFERENCES DES UNIVERSITES (monoappartenant)

Mr KESSEL Nils		Département d'Histoire de la Médecine / Faculté de Médecine	72. Epistémologie - Histoire des Sciences et des techniques
Mr LANDRE Lionel		ICUBE-UMR 7357 - Equipe IMIS / Faculté de Médecine	69. Neurosciences
Mme THOMAS Marion		Département d'Histoire de la Médecine / Faculté de Médecine	72. Epistémologie - Histoire des Sciences et des techniques
Mme SCARFONE Marianna	M0082	Département d'Histoire de la Médecine / Faculté de Médecine	72. Epistémologie - Histoire des Sciences et des techniques

B4 - MAITRE DE CONFERENCE DES UNIVERSITES DE MEDECINE GENERALE

Mme CHAMBE Juliette	M0108	Département de Médecine générale / Faculté de Médecine	53.03 Médecine générale (01.09.15)
---------------------	-------	--	------------------------------------

C - ENSEIGNANTS ASSOCIES DE MEDECINE GENERALE
C1 - PROFESSEURS ASSOCIES DES UNIVERSITES DE M. G. (mi-temps)

Pr Ass. GRIES Jean-Luc	M0084	Médecine générale (01.09.2017)
Pr Ass. KOPP Michel	P0167	Médecine générale (depuis le 01.09.2001, renouvelé jusqu'au 31.08.2016)

C2 - MAITRE DE CONFERENCES DES UNIVERSITES DE MEDECINE GENERALE - TITULAIRE

Dre CHAMBE Juliette	M0108	53.03 Médecine générale (01.09.2015)
---------------------	-------	--------------------------------------

C3 - MAITRES DE CONFERENCES ASSOCIES DES UNIVERSITES DE M. G. (mi-temps)

Dre BERTHOU anne	M0109	Médecine générale (01.09.2015 au 31.08.2018)
Dr BREITWILLER-DUMAS Claire		Médecine générale (01.09.2016 au 31.08.2019)
Dr GUILLOU Philippe	M0089	Médecine générale (01.11.2013 au 31.08.2016)
Dr HILD Philippe	M0090	Médecine générale (01.11.2013 au 31.08.2016)
Dr ROUGERIE Fabien	M0097	Médecine générale (01.09.2014 au 31.08.2017)
Dr SANSELME Anne-Elisabeth		Médecine générale

D - ENSEIGNANTS DE LANGUES ETRANGERES
D1 - PROFESSEUR AGREGE, PRAG et PRCE DE LANGUES

Mme ACKER-KESSLER Pia	M0085	Professeure certifiée d'Anglais (depuis 01.09.03)
Mme CANDAS Peggy	M0086	Professeure agrégée d'Anglais (depuis le 01.09.99)
Mme SIEBENBOUR Marie-Noëlle	M0087	Professeure certifiée d'Allemand (depuis 01.09.11)
Mme JUNGER Nicole	M0088	Professeure certifiée d'Anglais (depuis 01.09.09)
Mme MARTEN Susanne	M0098	Professeure certifiée d'Allemand (depuis 01.09.14)

E - PRATICIENS HOSPITALIERS - CHEFS DE SERVICE NON UNIVERSITAIRES

Dr ASTRUC Dominique	NRP6 CS	• Pôle médico-chirurgical de Pédiatrie - Serv. de Néonatalogie et de Réanimation néonatale (Pédiatrie 2) / Hôpital de Hautepierre
Dr ASTRUC Dominique (par intérim)	NRP6 CS	• Pôle médico-chirurgical de Pédiatrie - Service de Réanimation pédiatrique spécialisée et de surveillance continue / Hôpital de Hautepierre
Dr CALVEL Laurent	NRP6 CS	• Pôle Spécialités médicales - Ophtalmologie / SMO - Service de Soins Palliatifs / NHC et Hôpital de Hautepierre
Dr DELPLANCQ Hervé	NRP6 CS	- SAMU-SMUR
Dr GARBIN Olivier	CS	- Service de Gynécologie-Obstétrique / CMCO Schiltigheim
Dre GAUGLER Elise	NRP6 CS	• Pôle Spécialités médicales - Ophtalmologie / SMO - UCSA - Centre d'addictologie / Nouvel Hôpital Civil
Dre GERARD Bénédicte	NRP6 CS	• Pôle de Biologie - Département de génétique / Nouvel Hôpital Civil
Mme GOURIEUX Bénédicte	RP6 CS	• Pôle de Pharmacie-pharmacologie - Service de Pharmacie-Stérilisation / Nouvel Hôpital Civil
Dr KARCHER Patrick	NRP6 CS	• Pôle de Gériatrie - Service de Soins de suite de Longue Durée et d'hébergement gériatrique / EHPAD / Hôpital de la Robertsau
Pr LESSINGER Jean-Marc	NRP6 CS	• Pôle de Biologie - Laboratoire de Biologie et biologie moléculaire / Nouvel Hôpital Civil + Hautepierre
Mme Dre LICHTBLAU Isabelle	NRp6 Resp	• Pôle de Biologie - Laboratoire de biologie de la reproduction / CMCO de Schiltigheim
Mme Dre MARTIN-HUNYADI Catherine	NRP6 CS	• Pôle de Gériatrie - Secteur Evaluation / Hôpital de la Robertsau
Dr NISAND Gabriel	RP6 CS	• Pôle de Santé Publique et Santé au travail - Service de Santé Publique - DIM / Hôpital Civil
Dr REY David	NRP6 CS	• Pôle Spécialités médicales - Ophtalmologie / SMO - «Le trait d'union» - Centre de soins de l'infection par le VIH / Nouvel Hôpital Civil
Dr TCHOMAKOV Dimitar	NRP6 CS	• Pôle Médico-chirurgical de Pédiatrie - Service des Urgences Médico-Chirurgicales pédiatriques - HP
Mme Dre TEBACHER-ALT Martine	NRP6 NCS Resp	• Pôle d'Activité médico-chirurgicale Cardio-vasculaire - Service de Maladies vasculaires et Hypertension - Centre de pharmacovigilance / Nouvel Hôpital Civil
Mme Dre TOURNOUD Christine	NRP6 CS	• Pôle Urgences - Réanimations médicales / Centre antipoison - Centre Antipoison-Toxicovigilance / Nouvel Hôpital Civil

F1 - PROFESSEURS ÉMÉRITES

- o *de droit et à vie (membre de l'Institut)*
CHAMBON Pierre (Biochimie et biologie moléculaire)
- o *pour trois ans (1er septembre 2016 au 31 août 2019)*
BOUSQUET Pascal
PINGET Michel
- o *pour trois ans (1er septembre 2017 au 31 août 2020)*
BELLOCQ Jean-Pierre (Anatomie Cytologie pathologique)
CHRISTMANN Daniel (Maladies Infectieuses et tropicales)
MULLER André (Thérapeutique)
- o *pour trois ans (1er septembre 2018 au 31 août 2021)*
Mme DANION-GRILLIAT Anne (Pédopsychiatrie, addictologie)
- o *pour trois ans (1er avril 2019 au 31 mars 2022)*
Mme STEIB Annick (Anesthésie, Réanimation chirurgicale)

F2 - PROFESSEUR des UNIVERSITES ASSOCIE (mi-temps)

M. SOLER Luc CNU-31 IRCAD (01.09.2009 - 30.09.2012 / renouvelé 01.10.2012-30.09.2015-30.09.2021)

F3 - PROFESSEURS CONVENTIONNÉS* DE L'UNIVERSITE

Dr BRAUN Jean-Jacques	ORL (2012-2013 / 2013-2014 / 2014-2015 / 2015-2016)
Pr CHARRON Dominique	Université Paris Diderot (2016-2017 / 2017-2018)
Mme GUI Yaili	(Shaanxi/Chine) (2016-2017)
Mme Dre GRAS-VINCENDON Agnès	Pédopsychiatrie (2010-2011 / 2011-2012 / 2013-2014 / 2014-2015)
Dr JENNY Jean-Yves	Chirurgie orthopédique (2014-2015 / 2015-2016 / 2016-2017 / 2017-2018)
Mme KIEFFER Brigitte	IGBMC (2014-2015 / 2015-2016 / 2016-2017)
Dr KINTZ Pascal	Médecine Légale (2016-2017 / 2017-2018)
Dr LAND Walter G.	Immunologie (2013-2014 à 2015-2016 / 2016-2017)
Dr LANG Jean-Philippe	Psychiatrie (2015-2016 / 2016-2017 / 2017-2018)
Dr LECOCQ Jehan	IURC - Clémenceau (2016-2017 / 2017-2018)
Dr REIS Jacques	Neurologie (2017-2018)
Pr REN Guo Sheng	(Chongqing / Chine) / Oncologie (2014-2015 à 2016-2017)
Dr RICCO Jean-Baptiste	CHU Poitiers (2017-2018)

(* 4 années au maximum)

G1 - PROFESSEURS HONORAIRES

ADLOFF Michel (Chirurgie digestive) / 01.09.94	KURTZ Daniel (Neurologie) / 01.09.98
BABIN Serge (Orthopédie et Traumatologie) / 01.09.01	LANG Gabriel (Orthopédie et traumatologie) / 01.10.98
BAREISS Pierre (Cardiologie) / 01.09.12	LANG Jean-Marie (Hématologie clinique) / 01.09.2011
BATZENSCHLAGER André (Anatomie Pathologique) / 01.10.95	LEVY Jean-Marc (Pédiatrie) / 01.10.95
BAUMANN René (Hépatogastro-entérologie) / 01.09.10	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
BLICKLE Jean-Frédéric (Médecine Interne) / 15.10.2017	MAITRE Michel (Biochimie et biol. moléculaire) / 01.09.13
BLOCH Pierre (Radiologie) / 01.10.95	MANDEL Jean-Louis (Génétique) / 01.09.16
BOURJAT Pierre (Radiologie) / 01.09.03	MANGIN Patrice (Médecine Légale) / 01.12.14
BRECHENMACHER Claude (Cardiologie) / 01.07.99	MANTZ Jean-Marie (Réanimation médicale) / 01.10.94
BRETTES Jean-Philippe (Gynécologie-Obstétrique) / 01.09.10	MARESCAUX Jacques (Chirurgie digestive) / 01.09.16
BROGARD Jean-Marie (Médecine interne) / 01.09.02	MARK Jean-Joseph (Biochimie et biologie cellulaire) / 01.09.99
BURGHARDT Guy (Pneumologie) / 01.10.86	MESSER Jean (Pédiatrie) / 01.09.07
BURSZTEJN 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	MINCK Raymond (Bactériologie) / 01.10.93
CHAMPY Maxime (Stomatologie) / 01.10.95	MONTEIL Henri (Bactériologie) / 01.09.2011
CINQUALBRE Jacques (Chirurgie générale) / 01.10.12	MOSSARD Jean-Marie (Cardiologie) / 01.09.2009
CLAVERT Jean-Michel (Chirurgie infantile) / 31.10.16	OUDET Pierre (Biologie cellulaire) / 01.09.13
COLLARD Maurice (Neurologie) / 01.09.00	PASQUALI Jean-Louis (Immunologie clinique) / 01.09.15
CONRAUX Claude (Oto-Rhino-Laryngologie) / 01.09.98	PATRIS Michel (Psychiatrie) / 01.09.15
CONSTANTINESCO André (Biophysique et médecine nucléaire) / 01.09.11	Mme PAULI Gabrielle (Pneumologie) / 01.09.2011
DIETMANN Jean-Louis (Radiologie) / 01.09.17	POTTECHER Thierry (Anesthésie-Réanimation) / 01.09.18
DOFFOEL Michel (Gastroentérologie) / 01.09.17	REYS Philippe (Chirurgie générale) / 01.09.98
DORNER Marc (Médecine Interne) / 01.10.87	RITTER Jean (Gynécologie-Obstétrique) / 01.09.02
DUPEYRON Jean-Pierre (Anesthésiologie-Réa.Chir.) / 01.09.13	RUMPLER Yves (Biol. développement) / 01.09.10
EISENMANN Bernard (Chirurgie cardio-vasculaire) / 01.04.10	SANDNER Guy (Physiologie) / 01.09.14
FABRE Michel (Cytologie et histologie) / 01.09.02	SAUVAGE Paul (Chirurgie infantile) / 01.09.04
FISCHBACH Michel (Pédiatrie) / 01.10.2016	SCHAFF Georges (Physiologie) / 01.10.95
FLAMENT Jacques (Ophtalmologie) / 01.09.2009	SCHLAEDER Guy (Gynécologie-Obstétrique) / 01.09.01
GAY Gérard (Hépatogastro-entérologie) / 01.09.13	SCHLIENGER Jean-Louis (Médecine Interne) / 01.08.11
GERLINGER Pierre (Biol. de la Reproduction) / 01.09.04	SCHRAUB Simon (Radiothérapie) / 01.09.12
GRENIER Jacques (Chirurgie digestive) / 01.09.97	SCHWARTZ Jean (Pharmacologie) / 01.10.87
GROSSHANS Edouard (Dermatologie) / 01.09.03	SICK Henri (Anatomie Normale) / 01.09.06
GUT Jean-Pierre (Virologie) / 01.09.14	STIERLE Jean-Luc (ORL) / 01.09.10
HASSELMANN Michel (Réanimation médicale) / 01.09.18	STOLL Claude (Génétique) / 01.09.2009
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
IMBS Jean-Louis (Pharmacologie) / 01.09.2009	TEMPE Jean-Daniel (Réanimation médicale) / 01.09.06
IMLER Marc (Médecine interne) / 01.09.98	TREISSER Alain (Gynécologie-Obstétrique) / 24.03.08
JACQMIN Didier (Urologie) / 09.08.17	VAUTRAVERS Philippe (Médecine physique et réadaptation) / 01.09.13
JAECK Daniel (Chirurgie générale) / 01.09.11	VETTER Jean-Marie (Anatomie pathologique) / 01.09.13
JAEGER Jean-Henri (Chirurgie orthopédique) / 01.09.2011	VINCENDON Guy (Biochimie) / 01.09.08
JESEL Michel (Médecine physique et réadaptation) / 01.09.04	WALTER Paul (Anatomie Pathologique) / 01.09.09
KEHR Pierre (Chirurgie orthopédique) / 01.09.06	WEITZENBLUM Emmanuel (Pneumologie) / 01.09.11
KEMPF Jules (Biologie cellulaire) / 01.10.95	WIHLM Jean-Marie (Chirurgie thoracique) / 01.09.13
KREMER Michel (Parasitologie) / 01.05.98	WILK Astrid (Chirurgie maxillo-faciale) / 01.09.15
KRIEGER Jean (Neurologie) / 01.01.07	WILLARD Daniel (Pédiatrie) / 01.09.96
KUNTZ Jean-Louis (Rhumatologie) / 01.09.08	
KUNTZMANN Francis (Gériatrie) / 01.09.07	

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

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

Centre Régional de Lutte contre le cancer "Paul Strauss" - 3, rue de la Porte de l'Hôpital - F-67085 Strasbourg Cedex - Tél. : 03.88.25.24.24

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'HYPPOCRATE

En présence des maîtres de cette école, de mes chers condisciples, je promets et je jure au nom de l'Etre 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 souhaite remercier en premier lieu les membres du jury pour m'avoir fait l'honneur d'évaluer ce travail de thèse.

Merci au Professeur Maria GONZALEZ d'avoir accepté de présider ce jury. Un merci sincère pour tous vos enseignements et votre accompagnement bienveillant tout au long de mon internat, dont ce travail constitue en quelque sorte l'aboutissement. Merci de m'avoir transmis votre passion pour notre belle spécialité !

Je remercie très chaleureusement ma directrice de thèse, le Dr Simone MUNCH, pour avoir rendu ce travail possible. Merci pour ton soutien indéfectible, tes relectures attentives, ton efficacité et toute la considération que tu as pu manifester envers mon travail. Merci de m'avoir initié au monde « merveilleux » de la radioprotection et fait y prendre goût !

Un grand merci également à ma co-directrice de thèse le Dr Nathalie NOURRY. Merci pour tous tes précieux conseils sur la rédaction, la rigueur et la mise en forme de cette thèse. Merci pour ta confiance, ta disponibilité et ton franc-parler.

Merci au Dr Fabrice HUBELE d'avoir accepté de se joindre à mon jury. Soyez assuré de mon respect et de ma gratitude.

Merci à une certaine délégation d'un certain organisme de recherche (qui se reconnaîtra, anonymisation oblige) pour avoir accepté d'être le lieu de support de ce travail et d'avoir pris en charge les frais liés.

Un immense merci à toute l'équipe projet de l'étude 32P. Vous avez accepté d'y consacrer un temps non négligeable alors que je vous sais bien tous déjà très occupés : merci au personnel du Service Prévention, en particulier à Kévin, pour votre sympathie, vos conseils et notre coopération pluridisciplinaire. Un merci tout particulier à Denis, en sa qualité d'expert en radioprotection, pour tous vos conseils avisés tout au long de ce travail, votre implication dans le traitement des données dosimétriques, avoir fait le relais avec l'IRSN et pour votre relecture sur les aspects techniques de cet écrit. Merci aux différentes personnes qui ont contribué à la réalisation des différentes études de postes, en particulier à Anne-Catherine. Un grand merci également à Stéphanie et Nicolas pour votre implication et votre aide dans les calculs de dose. Enfin, merci à Thibaut et Marc-André pour les calculs de biostatistiques. Recevez tous l'expression de ma plus sincère gratitude !

Merci à tous ceux que j'ai pu croiser tout au long de mon internat, maîtres de stage ou collègues, vous qui avez tous chacun à sa manière participé à façonner ma pratique médicale.

Merci à toute l'équipe du Centre Antipoison de Strasbourg pour m'avoir donné goût à la toxicologie. Merci à l'équipe du F à Clémenceau, en particulier aux docteurs SEYNAEVE et MUHL. Merci à l'équipe de l'Institut de Médecine Légale de Strasbourg. Merci au reste de l'équipe de Pathologie Professionnelle, en particulier au Dr Stéphanie KLEINLOGEL.

Merci au Dr Stéphanie SCARFONE, pour ton tutorat au quotidien pendant mon semestre, ta sympathie, pour m'avoir fait découvrir le monde de la recherche et l'exercice bien singulier de la médecine de prévention dans ce milieu. Merci à Fatima et à Tania pour votre compagnie et votre bonne humeur !

Merci à l'équipe de l'ACST. Un merci particulier au Dr Jean-Michel WENDLING, pour ton énergie et ta curiosité communicatives !

Merci à l'équipe de médecine du Travail de la SNCF, en particulier au Dr Anne JANKOWSKI, pour votre accompagnement et pour vous être « prêtés au jeu » pour mon « Serious Game ».

Et parce qu'il n'y a pas que le travail dans la vie, un immense merci à tous ceux que j'ai dû négliger depuis quelques mois pour cause de « rédaction »... :

Merci à mes parents et grands-parents qui croient en moi depuis le début, m'ont toujours encouragé dans mon travail. Voici la concrétisation de mes études dans lesquelles vous m'avez toujours soutenu, et le début d'un nouveau chapitre de ma vie professionnelle. J'espère vous rendre fier. Avec tout mon amour filial.

Merci aux proches de la famille, qui se reconnaîtront, pour vos bons sentiments.

Merci à mes fantastiques amis, pour tous les bons moments passés et à venir : Anne, Barbara, Benjamin, Benoît, Candice, Clément, Cyril, Diane, François, Florian, Hande, Henrique, Ilia, Jean-Nicolas, Lea, Louis, Lucile, Manon, Marc-André, Margot, Marine, Nathan, Nikita, Paul, Régis, Thibaut, Vivien... et tous les autres qui se reconnaîtront... !

Merci à ma formidable promotion d'internat : Aurélie, Ingrid, Marie et Sarah. Merci aux autres membres, anciens et nouveaux, de la grande et soudée famille des internes de médecine du travail de Strasbourg, pour ces moments de complicité (ils se reconnaîtront...).

Merci à mes amis du bureau 2018/2019 de l'Association Nationale des Internes de Médecine du Travail. Travailler à vos côtés a été un plaisir en plus d'être prolifique !

Merci aux camarades du sport et du théâtre.

Merci à Lise pour ta présence et ton amour de tous les jours. Merci pour ta compréhension malgré tout le temps que ce travail a empiété sur notre vie commune.

Merci au café et au chocolat noir, carburants indispensables de tout thésard qui se respecte.

INDEX

Serment d'Hippocrate	14
Remerciements	15
Index	17
Iconographie.....	21
Liste des abréviations	22
Introduction.....	23
1. Généralités et Prérequis.....	24
1.1. La radioactivité	24
1.1.1. Rappels physiques	24
1.1.2. Exposition et interaction avec la matière et les tissus biologiques.....	25
1.1.2.1. Exposition naturelle et artificielle	25
1.1.2.2. Interaction avec la matière organique	29
1.2. La radioprotection	33
1.2.1. Socle réglementaire.....	33
1.2.1.1. Généralités	33
1.2.1.2. Textes européens	33
1.2.1.3. Réglementation française	33
1.2.1.4. Les instances.....	35
1.2.1.5. Préalables à l'utilisation de RI	36
1.2.2. Démarche de prévention.....	37
1.2.2.1. Evaluation du risque.....	37
1.2.2.2. EPC, EPI et signalisation du risque ambiant	40
1.2.3. Le Suivi des travailleurs	42
1.2.3.1. Le point de vue réglementaire	42
1.2.3.2. La dosimétrie individuelle	44
1.2.4. Mesurage des RI : le point de vue technique	46
1.2.4.1. Différents types d'appareils de mesure	46
1.2.4.2. Méthode de détection et limites techniques.....	46
1.2.4.3. Grandeur d'expression des résultats	48
1.2.5. Le suivi médical du personnel exposé	50
1.2.5.1. Généralités	50
1.2.5.2. Objectif du suivi médical	51
1.3. Spécificités santé/sécurité en recherche publique	51
2. Pré-étude.....	53
2.1. Constats et justification de la problématique	53

2.1.1. Genèse de cette étude	53
2.1.2. Cadre de notre intervention.....	55
2.1.3. Méthode des recherches préliminaires	56
2.2. Analyse de la littérature	57
2.2.1. Données locales.....	57
2.2.2. Données épidémiologiques	58
2.2.3. Articles de recherche.....	60
2.2.4. Conclusions.....	62
2.3. Etudes de poste préliminaires.....	63
2.3.1. Description et radiotoxicologie du ³² P.....	63
2.3.2. Poste retenu : contexte et protocole	63
2.3.3. Etude de poste.....	66
2.3.4. Constats, identification des risques	72
2.3.4.1. Estimation du risque accidentel.....	72
2.3.4.2. Exposition du torse.....	74
2.3.4.3. Exposition du reste du corps	76
2.3.4.4. Focus sur les mains.....	78
2.3.4.5. Conclusion	79
2.3.5. Autres visites de postes.....	79
2.4. Hypothèse	81
2.5. Objectifs.....	81
3. Matériel et méthode	82
3.1. Considérations préliminaires.....	82
3.1.1. Cahier des charges.....	82
3.1.2. Aspects financiers et logistiques	83
3.2. Choix du lieu de l'étude.....	85
3.3. Population, recrutement, information.....	85
3.4. Méthodologie de calcul.....	88
3.4.1. Les résultats dosimétriques.....	88
3.4.2. Comparaison bague versus poitrine.....	89
3.4.3. Calcul de dose prédictive par les PCR.....	91
3.4.4. Détail des tests statistiques.....	91
3.4.4.1. Test statistique principal	91
3.4.4.2. Tests statistiques secondaires.....	92
4. Résultats	93
4.1. Instituts inclus et leur descriptif	93
4.2. Durée, effectifs, flow chart.....	93
4.3. Tableaux de suivi	94

4.4. Résultats des mesures dosimétriques.....	94
4.5. Résultats du questionnaire post étude	96
4.6. Significativité des résultats dosimétriques.....	100
4.6.1. Analyse des résultats des dosimètres de poitrine.....	100
4.6.2. Analyse des résultats des dosimètres bagues	101
4.7. Comparaison des résultats dosimétriques.....	104
4.8. Analyses secondaires.....	104
4.8.1. Différence d'exposition entre les mains.....	104
4.8.2. Différence d'exposition inter institut	105
4.8.3. Comparaison valeurs mesurées versus valeurs théoriques	105
5. Discussion.....	107
5.1. Considérations générales	107
5.2. Commentaires sur la dosimétrie bague	107
5.2.1. Comparaison aux statistiques IRSN	107
5.2.2. La nature des sources manipulées	108
5.2.3. Les conditions de manipulation	108
5.2.4. La représentativité de ce qui a été observé	109
5.2.5. Les modalités d'utilisation des dosimètres	110
5.2.6. Les caractéristiques des agents.....	110
5.2.7. Les limites techniques	111
5.2.8. La bague témoin	112
5.2.8.1. Le nombre de bagues témoins.....	112
5.2.8.2. Dosimètres « cas » inférieurs au témoin.....	114
5.2.9. Méthode de calcul de significativité.....	114
5.2.10. La puissance statistique.....	114
5.2.11. Estimation des marges de sécurité	116
5.3. Commentaires sur la dosimétrie de poitrine	117
5.4. Comparaison des dosimétries	117
5.4.1. Parallélisme des périodes de port	117
5.4.2. Mode de calcul	118
5.5. Tableaux de suivi et questionnaire post étude	119
5.5.1. Tableaux de suivi	119
5.5.2. Questionnaires post-étude.....	120
5.5.3. Compilation des deux.....	120
5.6. Analyses secondaires.....	121
5.6.1. Comparaison selon la main	121
5.6.2. Comparaison par institut.....	122
5.6.3. Comparaison aux valeurs théoriques.....	122

5.7. Validation ou non de l'hypothèse et des objectifs.....	124
5.8. Divers.....	124
6. Mise à profit des résultats.....	127
6.1. Démarche de réflexion de l'équipe projet.....	127
6.2. Propositions formulées.....	128
6.2.1. Aspects généraux.....	128
6.2.1.1. Intégration dans les documents relatifs à la prévention.....	128
6.2.1.2. Pouvoir du CRP et classifications.....	129
6.2.2. Radioprotection et suivi dosimétrique.....	130
6.2.2.1. Généralités.....	130
6.2.2.2. Choix de la dosimétrie individuelle.....	131
6.2.2.3. Guide des bonnes pratiques.....	132
6.2.2.4. Réorientation du budget.....	133
6.2.3. Suivi médical.....	134
6.2.4. Information aux agents.....	135
6.2.5. Obstacles prévisibles.....	136
6.3. Communication des résultats.....	137
6.3.1. Restitution aux agents.....	137
6.3.2. Séminaire des PCR.....	137
6.3.3. CRHSCT.....	138
6.3.4. Nationale.....	138
6.4. Projections.....	138
Conclusion.....	140
Annexes.....	144
Bibliographie.....	149

ICONOGRAPHIE

Figures :

Figure 1: Exposition moyenne aux RI par personne et par an	26
Figure 2: Quelques exemples de radioactivité naturelle	26
Figure 3: Schéma des différents types d'exposition	28
Figure 4: Schéma des différents effets possibles des RI sur l'ADN	30
Figure 5: Modélisation d'un effet déterministe	31
Figure 6: Principaux effets déterministes connus des RI	31
Figure 7: Modélisation d'un effet stochastique	32
Figure 8: Tableau de Maladie Professionnelle n°6 du régime général	32
Figure 9: Algorithme synthétisé de la démarche générale de radioprotection.....	40
Figure 10: Schématisation du zonage en radioprotection	41
Figure 11: Classification des travailleurs en fonction de leur exposition.....	44
Figure 12: Exemples d'appareils de mesure des RI.....	49
Figure 13: Extrait de relevé dosimétrique dans notre population d'étude	53
Figure 14: Répartition des effectifs suivis et des doses enregistrées aux extrémités en 2017	58
Figure 15: Statistiques d'exposition aux RI IRSN 2017	59
Figure 16: Protocole schématisé de la manipulation observée dans notre étude de poste	65
Figure 17: Vue générale du plan de travail de l'étude de poste	66
Figure 18: Etude de poste illustrée et commentée.....	71
Figure 19: Périodes comparées entre dosimétrie bague et poitrine	84
Figure 20: Exemple de port de dosimètre bague tel que demandé dans l'étude.....	87
Figure 21: Flow Chart	93
Figure 22: Graphique récapitulatif des résultats bruts des dosimètres bagues	95
Figure 23: Résultats du questionnaire post étude	99
Figure 24: Résultats numériques des dosimètre bagues	102
Figure 25: Principaux descriptifs statistiques des valeurs des dosimètres « cas »	103
Figure 26: Représentation graphique des résultats dosimétriques avec calcul de positivité.....	103
Figure 27: Valeurs inter opérateurs des ratios main non dominante/dominante.....	104
Figure 28: Valeurs d'exposition mesurée versus calculée pour les opérateurs de l'I2	106
Figure 29: Dosimétries bagues de notre étude versus moyenne du secteur recherche	108
Figure 30: Exemple de pipette à écran.....	134

Annexes :

Annexe 1: Plaquette d'information distribuée aux agents inclus dans l'étude	144
Annexe 2: Exemple de tableau de suivi (modèle finalement utilisé qu'à l'I1)	145
Annexe 3: Tableau de suivi utilisé à l'I2	145
Annexe 4: Résultats dosimétriques donnés par l'IRSN	146
Annexe 5: Résultats détaillés du questionnaire post-étude	147

LISTE DES ABREVIATIONS

³²P : Phosphore 32
ADN : Acide DésoxyriboNucléique
AP : Assistant de Prévention
ARN : Acide RiboNucléique
ASN : Agence de Sûreté Nucléaire
Bq : Becquerel
CRHSCT : Comité Régional d'Hygiène et Sécurité des Conditions de Travail
COFRAC : COmité FRançais d'ACcréditation
CRP : Conseiller en Radioprotection
CRRMP : Comité Régional de Reconnaissance en Maladie Professionnelle
(Bague/Main) D : (Bague/Main) Droite
DU : Directeur d'Unité
DUER : Document Unique d'Evaluation des Risques
EPC : Equipement de Protection Collectif
EPI : Equipement de Protection Individuel
eV : electronVolt
(Bague/Main) G : (Bague/Main) Gauche
I1 : Institut numéro 1 (inclus dans l'étude)
I2 : Institut numéro 2 (inclus dans l'étude)
IC : Intervalle de Confiance
IRSN : Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire
MDT : Médecin Du Travail
MP : Maladie Professionnelle
n/a : non applicable
nc : non concerné
NS : Non Significatif
OCR : Organisme Compétent en Radioprotection
p : indice de significativité statistique
PCR : Personne Compétente en Radioprotection
RI : Rayonnement Ionisant
QSE : Qualité Sécurité Environnement
RN : RadioNucléide
SISERI : Système d'Information et de Surveillance de l'Exposition aux Rayonnements Ionisants
Sv : Sievert
Sv.éq : Sievert équivalent extrémités (pondération hp0.07)
VLEP : Valeur Limite d'Exposition Professionnelle

INTRODUCTION

L'étude et la mise à profit de la radioactivité est un vaste champ de recherche en physique. Depuis sa découverte, notre connaissance de cette propriété si singulière (et si indispensable !) de la matière ne cesse de croître. Cependant, la radioactivité, et plus généralement les rayonnements ionisants, ne sont pas sans danger, comme en atteste la leucémie radio-induite de la radiophysicienne Marie Curie.

Dès 1904, le radiologue français A.Beclère présentait ces dangers et a cherché à avertir ses confrères (1). Depuis l'essor de la radioprotection dans les années 1920 avec les travaux de R.Sievert et l'invention du compteur Geiger-Müller (1), de nombreux progrès ont façonné l'évolution de cette discipline jusqu'à sa forme actuelle. Domaine tout à fait singulier du vaste monde de la prévention des risques professionnels, la radioprotection a la tâche difficile de rendre compte d'un danger par nature invisible et imperceptible pour l'œil humain. S'il peut être « facile » et « rapide » de se représenter un risque de coupure et d'accepter de porter des EPI en conséquence, il est bien plus complexe et long de se familiariser avec le risque radioactif. L'information et la sensibilisation sont des clés en matière de radioprotection pour faire accepter les moyens de prévention et de dosimétrie aux salariés exposés.

La démarche de radioprotection se doit idéalement, comme toute démarche de prévention, d'être adaptée, acceptable et ciblée sur le risque réel constaté par étude de poste. Il ne s'agit en effet pas de se limiter à une application de protocoles « déconnectés » du terrain. Elle se doit par ailleurs d'être capable de se remettre en question périodiquement et d'évoluer afin de s'adapter à d'éventuels changements dans les conditions de travail.

C'est au croisement de ces différentes considérations que se situe notre étude. Depuis un état d'anxiété latent de salariés estimant avoir un « faux » sentiment de sécurité jusqu'à la formulation de propositions d'évolutions des pratiques, en passant par de nouvelles études observationnelles et métrologiques plus ciblées des postes de travail, nous avons souhaité remettre en question un certain ordre établi, aller plus loin dans l'adaptation de la radioprotection au travail réel, et apporter une vraie réponse aux salariés quant à leur risque professionnel.

1. GENERALITES ET PREREQUIS

1.1 LA RADIOACTIVITE

1.1.1. RAPPELS PHYSIQUES (2-4)

La radioactivité est un phénomène lié à la structure de la matière, composée d'atomes électriquement neutres, eux-mêmes composés d'un noyau et d'électrons gravitant autour (chargés négativement). Le noyau comprend des protons (chargés positivement) et des neutrons (charge neutre). Le nombre de protons d'un noyau va définir à quel élément chimique il correspond. Le nombre de neutrons va définir l'isotope. Il peut être stable, auquel cas (hors action extérieure par exemple à type de collision...) il conservera sa structure, ou être instable et donc radioactif.

La radioactivité se manifeste par l'émission de particules (α : noyaux d'hélium, β^+ : positons, β^- : électrons) ou de photons (X ou γ selon leur énergie) à partir de l'atome instable afin de retrouver un état de stabilité. Cette émission peut se traduire par un changement d'élément chimique entre le nucléide précurseur et le ou les nucléides descendants. Plusieurs cycles de transformation peuvent être nécessaires pour retrouver un état de stabilité, on parle alors de cascade radioactive.

Ces émissions ont parfois la propriété de pouvoir ioniser la matière quand elles interagissent avec elle, soit de manière directe (particule chargée), soit de manière indirecte (arrachage d'électron...). Ces rayonnements ne sont pas visibles et nécessitent des appareillages appropriés pour être mesurés.

On parle de « **rayonnement primaire** » en cas d'émission spontanée par une source radioactive. On parle de « **rayonnements secondaires** » lorsqu'ils résultent d'interactions entre rayonnements primaires et la matière (par diffusion, freinage...).

Une source radioactive (ensemble d'éléments radioactifs groupés dans une unité d'espace) possède une **activité « A »** mesurée en **Becquerel (Bq)**, un Bq correspondant à une désintégration par seconde. Un élément radioactif possède une **période (ou demi-vie) radioactive** propre « **$T^{1/2}$** » qui est le temps au bout duquel l'activité de la source a diminué de moitié. Elle est liée à sa constante radioactive « λ » par la formule $T^{1/2} = 0.693/\lambda$. L'activité est liée à la constante radioactive par la

formule $A = \lambda N$, N étant le nombre de noyaux radioactifs de l'échantillon. On ne sait pas influencer sur la période radioactive d'un élément. De fait, on ne peut considérer la radioactivité qu'à une échelle globale (un échantillon radioactif sera désintégré de moitié en une fois sa période radioactive) et non pas individuelle (on ne peut pas prédire quel noyau va se désintégrer à quel moment).

L'énergie d'un rayonnement s'exprime en **électronvolts (eV)** ($1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19}$ joules). La gamme d'énergie des rayonnements primaires et secondaires possibles va jusqu'à plusieurs MeV. On peut observer une ionisation de la matière à partir de 10eV. La **dose absorbée (D)** s'exprime comme suit : $D = \text{énergie absorbée (joules)} / \text{masse de matière irradiée (kg)}$ et s'exprime en **Gray (Gy)** qui correspond à 1J par Kg. Le débit de dose s'exprime en Gy par heure.

Concernant l'exposition d'un tissu vivant à la radioactivité, les notions de « **dose équivalente** » et de « **dose efficace** » rendent compte de la spécificité des interactions dans ce cas de figure. La dose équivalente s'exprime en **Sievert (Sv)** et se calcule comme suit : Dose équivalente (E) (en Sv) = Dose absorbée (Gy) $\times W_r$ où W_r est un facteur de pondération radiologique, défini pour chaque type de particule. La dose efficace (H) (en Sv) est la somme des doses équivalentes reçues par chaque tissu, chacune affectée d'un facteur pondération tissulaire propre W_t , fonction de sa sensibilité aux RI, tel que : Dose efficace (H) = $\sum E(x) \times W_{t(x)}$.

1.1.2. EXPOSITION ET INTERACTION AVEC LA MATIERE ET LES TISSUS BIOLOGIQUES(2–9)

1.1.2.1. EXPOSITION NATURELLE ET ARTIFICIELLE

La dose efficace reçue en moyenne par la population en France est estimée à 4,5 mSv/an, dont 2,9 mSv/an dus aux sources naturelles et 1,6 mSv/an dus aux sources artificielles. Les contributions des différentes sources d'exposition sont synthétisées dans la figure 1 :

Bilan IRSN 2015 (Total = 4,5 mSv/an)

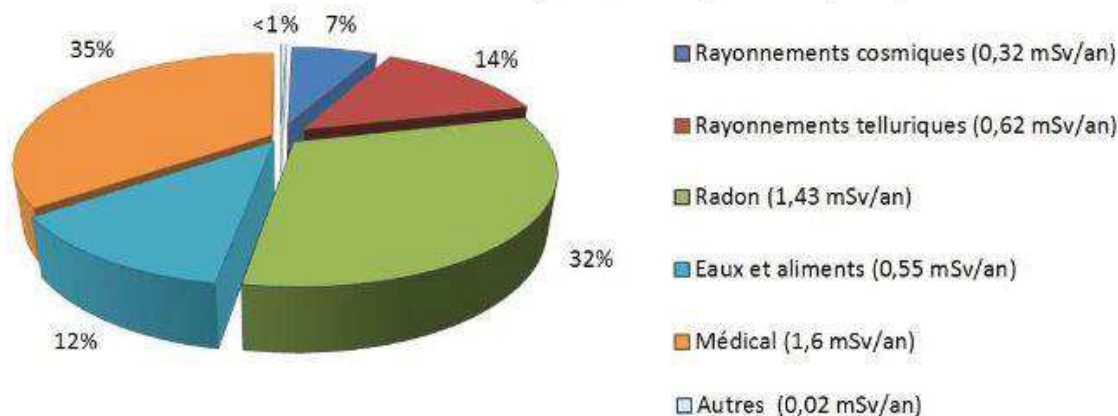


Figure 1 : Exposition moyenne aux RI par personne et par an (9)

Schématiquement, 1/3 proviennent des expositions médicales (radiographies, scanners...) et 2/3 des expositions naturelles/environnementales, le radon (gaz issu de la dégradation de l'uranium et du thorium de la croûte terrestre) en représentant environ la moitié.

La **radioactivité naturelle** provient de deux phénomènes. Premièrement, la création de l'univers, à l'origine du temps et de la matière, dont environ 70 types de RN « originels ». On n'en retrouve aujourd'hui plus que 20 ainsi que certains « descendants radioactifs » des éléments disparus. Ensuite, la création en permanence de RN dans la haute atmosphère liée à l'« activation » de la matière par le rayonnement cosmique.

L'exposition à cette radioactivité est très variable d'un endroit à l'autre : composition et porosité du sol traversé pour le radon et l'eau de boisson, régime alimentaire... (cf figure 2)

Le rayonnement cosmique provient des ions, protons (surtout)... déviés par l'atmosphère et la magnétosphère terrestre, qui se raréfient avec l'altitude... En conséquence l'exposition est plus importante lors de séjours en hauteur et/ou de voyages en avion.

Substances	Activité
Poisson	100 Bq/kg
Pomme de terre	100 à 150 Bq/kg
Huile de table	180 Bq/l
Lait	50 Bq/l (⁴⁰ K)
	80 Bq/l (radioactivité naturelle totale)
Eau minérale	1 Bq/l (²²⁶ Ra)
	2 Bq/l (²³⁸ U)
Eau de pluie	0,3 à 1 Bq/l
Eau de l'Isère	0,3 Bq/l
Eau de mer	10 Bq/l
Sol sédimentaire	400 Bq/kg
Sédiments de l'Isère (⁴⁰ K)	1 000 Bq/kg
Sol granitique	8 000 Bq/kg

Figure 2 : Quelques exemples de radioactivité naturelle (1)

La radioactivité naturelle du corps humain (due surtout au ^{40}K et au ^{14}C , dont la quantité est fonction de l'alimentation et de l'environnement) est en moyenne de 8000 Bq pour un adulte de 70kg. Certaines activités humaines ont indirectement un effet sur la radioactivité naturelle (isolation des maisons et exposition au radon, gestions des déchets radioactifs et contamination des sols/nappes phréatiques...).

La **radioactivité artificielle**, par opposition, est le fait (depuis le début du XXe siècle) des activités de l'Homme, et peut concerner des RN n'existant plus à l'état naturel. Aujourd'hui, de nombreux secteurs (médical, industrie, militaire, recherche...) en exploitent des applications très variées : analyse, contrôle, jauges, traceurs, désinfection, stérilisation, radiothérapie, armement, chimie sous rayonnement... Ces activités libèrent dans l'environnement certains radioéléments. En France, cette présence de radioactivité « artificielle » a trois origines :

- 1) Les rejets règlementés et autorisés des installations nucléaires (centrales, médecine nucléaire...);
- 2) Les retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires (1945 à 1980) et de l'accident de Tchernobyl (1986) ainsi que les rejets « sauvages » de déchets radioactifs ;
- 3) La rémanence des essais nucléaires et de l'accident suscités, qui constituent le « bruit de fond » de la radioactivité artificielle.

On distingue deux types de sources radioactives : d'une part les **sources scellées**, dont le conditionnement est prévu pour empêcher la dispersion du rayonnement radioactif dans le milieu ambiant, et à l'inverse les **sources non scellées**, qui n'ont pas ces propriétés. A part, il faut considérer les appareils électriques **générateurs de rayons X et accélérateurs de particules** où, techniquement, il n'y a génération de rayonnement que si l'appareil est en fonctionnement.

Dans le cadre du risque radioactif chez l'humain, il convient de différencier la notion d'exposition et de contamination.

L'**exposition** correspond à l'interaction d'un rayonnement radioactif avec la matière de l'individu cible. On considère deux cas de figure :

- **L'exposition externe**, si la source radioactive est à l'extérieur de la cible. Dans ce cas, l'air, les EPC/EPI seront autant de barrières de protection entre le rayonnement et la personne ;
- **L'exposition interne**, quand la source a pénétré dans l'organisme de l'individu cible (ingestion, inhalation, blessure...) et que la désintégration radioactive se produit à l'intérieur de lui avant excrétion. Ici, les tissus sont directement exposés. On considère la période biologique (notion différente de la période radioactive) d'un élément comme le temps nécessaire à la clairance de la moitié de sa quantité initiale (fonction de son tropisme, sa métabolisation...). Avec la période biologique et la période radioactive, on peut calculer la période effective, qui prend en compte la clairance et la désintégration, et par déduction la dose effectivement délivrée dans l'organisme en un temps donné.

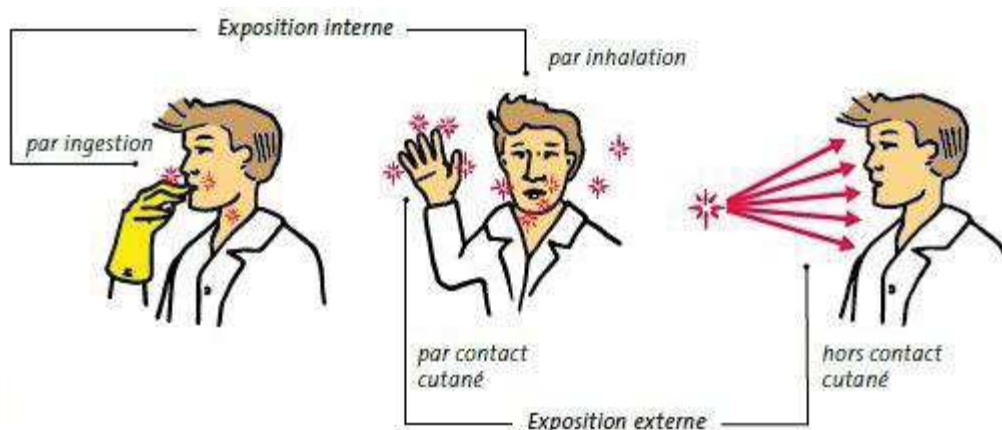


Figure 3: Schéma des différents types d'exposition (1)

La contamination est la présence indésirable d'une substance radioactive qui ne s'est pas encore désintégrée. Si aucune décontamination n'est réalisée, elle pourra être responsable d'une exposition (externe ou interne) lors de sa désintégration. Là encore, on distingue plusieurs cas :

- **La contamination surfacique** (plans de travail, vêtements...) qui est soit « fixée » si elle ne peut pas se disséminer soit « non fixée » si elle est diffusable (remise en suspension, aérosolisation...) ;
- **La contamination atmosphérique**, mesurée en Bq/m³, quand l'air respirable est souillé, l'exposition variant selon le débit respiratoire de l'individu cible ;
- **La contamination corporelle**, soit cutanée soit interne (avec, en cas d'excrétion, remise en circulation dans l'environnement et exposition/contamination secondaire possible).

1.1.2.2. INTERACTION AVEC LA MATIERE ORGANIQUE

La gamme d'énergie des rayonnements des RN utilisés couramment se situe entre 10 keV et 10 Mev. On distingue schématiquement 3 grands groupes « d'entités » de rayonnement, avec chacun son mode d'action et des caractéristiques propres quant à leur interaction avec la matière organique. Nous ne détaillerons que celui relatif au ^{32}P (1A).

1) Les particules chargées

A - légères (électrons et positons du rayonnement β) : elles ont une trajectoire sinueuse dans l'espace relativement limitée en distance (fonction surtout de la densité en électrons de la matière traversée). Ils sont généralement stoppés par 3m d'air, 10mm de plexiglas, 7mm d'aluminium (10). Le rayonnement du ^{32}P , relativement énergétique, peut traverser au maximum l'organisme jusqu'à l'hypoderme. En dessous de 100keV, on peut considérer la pénétration des rayonnements β (en exposition externe) comme négligeable : elle est stoppée par la couche cornée de l'épiderme (11). En contamination interne, le pouvoir d'arrêt des cellules est très variable selon le tissu. Les conséquences sont fonction de deux phénomènes. Premièrement, la collision de la particule avec les électrons de la matière traversée, qui provoque soit un arrachement d'électron(s) avec production d'ion(s) positif(s) soit le déplacement d'électrons sur d'autres orbitales avec « excitation » de la matière (leur réorganisation spontanée dans leur état d'équilibre conduisant à l'émission de chaleur, de rayons X mono-énergiques +/- de luminescence). Le deuxième mécanisme est le freinage, conséquence de la modification (courbure) de la trajectoire de la particule chargée au voisinage d'un noyau (chargé positivement). Cette perte d'énergie engendre un spectre de rayonnement X « de freinage » continu, pouvant aller de d'une valeur infinitésimale d'eV jusqu'à l'énergie initiale de la particule. Plus le noyau est chargé (numéro atomique haut) plus la déviation (et donc le rayonnement) sera importante. De fait, il convient d'utiliser en protection des matériaux de faible numéro atomique. Le plexiglas est fréquemment utilisé à cet effet.

B - Lourdes (protons, ions accélérés, rayonnement α) quant à elles, ont une trajectoire rectiligne et très courte dans l'espace (quelques cm d'air pour les particules α). Bien que très ionisantes, la probabilité d'une exposition externe est minime.

- 2) **Les rayonnements électromagnétiques X** (issus des électrons lors de leur réarrangement ou freinage) et γ (issus du noyau de l'atome lors de sa désintégration) ont une trajectoire longue et peuvent traverser le corps humain de part en part. Ils peuvent interagir avec la matière via l'effet photoélectrique, l'effet Compton et l'effet de « dématérialisation ».
- 3) **Les neutrons**, particules lourdes non chargées, peuvent facilement pénétrer dans les noyaux, où ils peuvent « activer » la matière stable en RN, de trois manières : la réaction « élastique », la réaction inélastique et la capture radiative.

L'irradiation de la matière vivante peut se traduire biologiquement de plusieurs manières :

- **Une ionisation des molécules** (radiolyse) avec modification de leurs propriétés chimiques (perte ou modification de capacités de signalisation, de support, de transduction...) pouvant mener à une authentique « destruction » radio induite d'une cellule ;

- **L'altération de l'ADN** (cf figure 4) et donc du code génétique, essentiellement via des ruptures simple brin et double brin. Des systèmes enzymatiques de réparation existent dans la cellule et permettent de réparer le plus souvent à l'identique les lésions simples brins, plus difficilement les ruptures doubles brins. Dans les cas où la réparation est incomplète ou fautive (incorporation d'une mauvaise base) il y a modification du code génétique. Les conséquences peuvent être très variées en fonction de la région touchée et du type de modification (zone codante ou

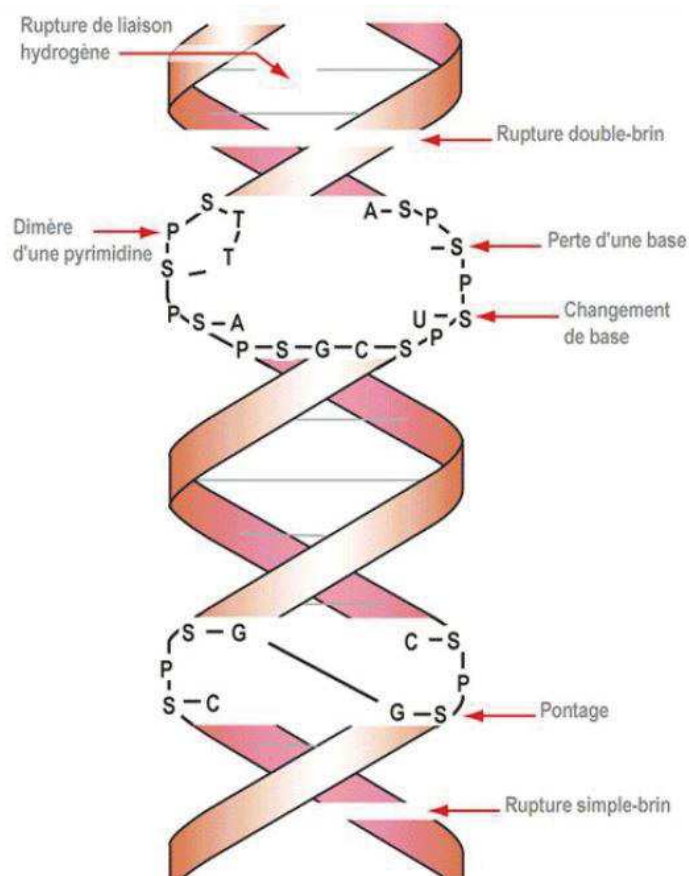


Figure 4: Schéma des différents effets possibles des RI sur l'ADN (2)

non, modification activatrice ou inhibitrice...) avec par exemple l'inactivation des capacités de division cellulaire, l'entrée en apoptose d'une cellule, une oncogénèse...

En conséquence, deux types d'effets peuvent apparaître : déterministes ou aléatoires.

Les **effets déterministes** sont observés aux fortes doses, apparaissent obligatoirement au-dessus d'un seuil, leur gravité augmentant avec la dose. Ce type d'effets est schématisé en figure 5.

Ces effets apparaissent après une durée de quelques jours à semaines et traduisent des dégâts cellulaires directs. Ils peuvent être réversibles. A titre indicatif, pour le corps entier, on n'observe pas

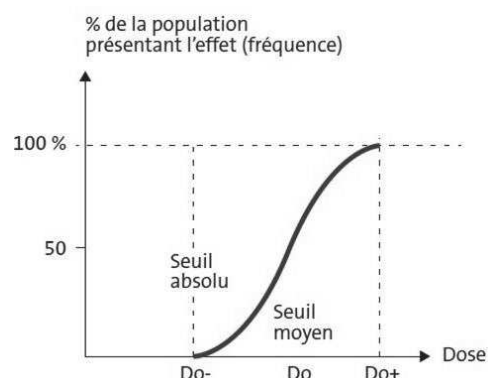


Figure 5: Modélisation d'un effet déterministe (1)

d'effets déterministes en dessous de 500mSv. Localement au niveau de la peau une dose de 3 à 8 Sv entraîne un érythème passager, entre 7 et 10Sv une phlyctène et au-dessus de 10 Sv une nécrose (12). La tératogénicité radio-induite est mal connue. L'effet principal serait un retard mental. On « admet » un risque négligeable pour une dose ≤ 100 mSv et un risque sérieux à partir de 200 mSv, dose à laquelle la question d'une interruption médicale de grossesse peut être évoquée. Les principaux effets déterministes sont résumés dans la figure 6 :

Effets déterministes recensés	Dose d'irradiation
Diminution temporaire des spermatozoïdes	à partir de 0,15 Gy
Diminution temporaire des leucocytes (famille de globules blancs)	de 0,2 à 1 Gy
Atteinte oculaire : opacités détectables	à partir de 0,5 Gy
Nausée, asthénie Modification de la formule sanguine Effet immunodépresseur (risques d'infections) <i>Sous surveillance médicale, le retour à la normale se produit rapidement.</i>	de 1 à 2 Gy
Risque de stérilité féminine	à partir de 2,5 Gy
Erythème	3 Gy
Stérilité masculine définitive	de 3,5 à 6 Gy
Aplasie (arrêt ou insuffisance du développement d'un tissu ou d'un organe). En l'absence de traitement, au moins la moitié des personnes irradiées meurent et il existe des risques de séquelles.	à partir de 4,5 Gy
Atteinte gastro-intestinale	6 Gy
Atteinte pulmonaire	8 Gy
Coma, mort cérébrale Mort inévitable	au delà de 10 Gy

Figure 6: Principaux effets déterministes connus des RI (2)

Les **effets aléatoires (ou stochastiques)** correspondent aux effets cancérogènes et mutagènes. Ils peuvent s'observer à des doses faibles ou moyennes (au-delà ils sont « masqués » par les effets déterministes), sont spontanément irréversibles, et apparaissent aléatoirement (la probabilité augmentant néanmoins avec la dose cumulée) et ce en l'absence de dose seuil minimale connue. Leur temps d'apparition est long et la gravité des effets est indépendante du niveau d'exposition. Ce type d'effet est schématisé par le graphique de la figure 7.

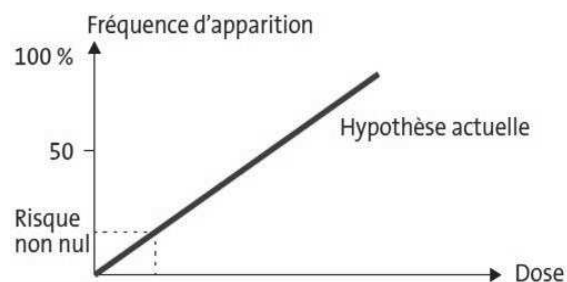


Figure 7: Modélisation d'un effet stochastique (1)

Certaines affections susceptibles d'être induites par les RI peuvent être reconnues et indemnisées en tant que maladie professionnelle au titre du tableau N°6 du régime général (13) (figure 8) ou au cas par cas en procédure hors tableau via le CRRMP.

DÉSIGNATION DES MALADIES	DELAI DE PRISE EN CHARGE	LISTE INDICATIVE DES PRINCIPAUX TRAVAUX SUSCEPTIBLES DE PROVOQUER CES MALADIES
Anémie, leucopénie, thrombopénie ou syndrome hémorragique consécutifs à une irradiation aiguë.	30 jours	
Anémie, leucopénie, thrombopénie ou syndrome hémorragique consécutifs à une irradiation chronique.	1 an	
Blépharite ou conjonctivite.	7 jours	
Kératite.	1 an	Tous travaux exposant à l'action des rayons X ou des substances radioactives naturelles ou artificielles, ou à toute autre source d'émission corpusculaire, notamment :
Cataracte.	10 ans	Extraction et traitement des minerais radioactifs ;
Radiodermites aiguës.	60 jours	Préparation des substances radioactives ;
Radiodermites chroniques.	10 ans	Préparation de produits chimiques et pharmaceutiques radioactifs ;
Radio-épithélite aiguë des muqueuses.	60 jours	Préparation et application de produits luminescents radifères ;
Radiolésions chroniques des muqueuses.	5 ans	Recherches ou mesures sur les substances radioactives et les rayons X dans les laboratoires ;
Radionécrose osseuse.	30 ans	Fabrication d'appareils pour radiothérapie et d'appareils à rayons X ;
Leucémies.	30 ans	Travaux exposant les travailleurs au rayonnement dans les hôpitaux, les sanatoriums, les cliniques, les dispensaires, les cabinets médicaux, les cabinets dentaires et radiologiques, dans les maisons de santé et les centres anticancéreux ;
Cancer broncho-pulmonaire primitif par inhalation.	30 ans	Travaux dans toutes les industries ou commerces utilisant les rayons X, les substances radioactives, les substances ou dispositifs émettant les rayonnements indiqués ci-dessus.
Sarcome osseux.	50 ans	

Figure 8: Tableau de Maladie Professionnelle n°6 du régime général

1.2. LA RADIOPROTECTION

1.2.1. SOCLE REGLEMENTAIRE (2–4,14)

1.2.1.1. GENERALITES

La radioprotection regroupe toutes les actions théoriques et pratiques ayant pour but de prévenir ou limiter les risques sanitaires dus aux rayonnements ionisants, quelle que soit leur origine. Trois grands principes en forment la base (15) :

- **La justification** : la tâche exposante doit avoir une raison d'être valable (avantages individuels ou collectifs d'un point de vue sanitaire, économique, scientifique...);
- **L'optimisation** : le niveau d'exposition, sa probabilité de survenue et le nombre de personnes exposées doivent suivre le principe « ALARA » (As Low As Reasonably Achievable : aussi faible que raisonnablement réalisable) ;
- **La limitation des expositions individuelles** : elles doivent être maintenues en dessous des limites réglementaires (elles-mêmes bien en dessous des seuils d'effets déterministes) et en tout état de cause le plus bas possible.

Contrairement à d'autres risques professionnels, les RI disposent d'une réglementation propre, qui est par ailleurs très dense et stricte. Nous n'en citerons que certains éléments, qui s'appliquent par ailleurs dans les laboratoires de notre étude. En particulier, dans le reste de ce chapitre, les éléments qui auront des implications importantes dans notre étude seront présentés *en gras italique*.

1.2.1.2. TEXTES EUROPEENS :

La Communauté européenne de l'énergie atomique (EURATOM) a été créée par un traité en 1957, et constitue la base sur laquelle sont adoptées les directives dites « Euratom ». Celle faisant actuellement autorité est la ***Directive 2013/59 du 05/12/2013 fixant les normes de base relatives à la protection sanitaire contre les dangers résultant de l'exposition aux rayonnements ionisants*** (16).

1.2.1.3. REGLEMENTATION FRANÇAISE

Les textes devant être pris en compte dans le droit Français résultent de la transposition des directives EURATOM successives dans le Code de la santé publique, le Code du travail voire le code de

la Défense. Ces codes sont complétés par des arrêtés, des circulaires, des guides et des avis homologués de l'ASN. Actuellement, les principaux textes faisant référence sont les **décret n°2018-437 et 438 du 4 juin 2018 relatifs à la protection contre les risques dus aux rayonnements ionisants auxquels sont soumis certains travailleurs**(17,18), complétés par **l'Instruction Technique DGT/ASN/2018/229 du 2 octobre 2018** (19) et **l'Arrêté du 26 juin 2019 relatif à la surveillance individuelle de l'exposition des travailleurs aux rayonnements ionisants** (20), le tout traduisant en droit français la *directive 2013/59/EURATOM*. D'autres textes relatifs à cette traduction sont attendus.

Concernant le droit du travail, il existe schématiquement quatre grands thèmes : « protection des travailleurs (y compris les travailleurs non-salariés) », « protection du public et de l'environnement », « protection des patients », « protection des personnels des unités d'intervention d'urgence ». Sont concernés notamment les *articles L. 4451-1 51 et L. 4451-2 52, R.4451-1 à R. 4451-144* du Code du travail. Dans la fonction publique d'Etat, dont relèvent les laboratoires de notre étude, c'est le **décret n°82-453 du 28 mai 1982 modifié relatif à l'hygiène et à la sécurité du travail ainsi qu'à la prévention médicale dans la fonction publique** (21) qui définit l'organisation générale des aspects santé et sécurité au travail. En l'absence de données, ce sont les articles qui relèvent de la IVème partie du code du travail, livres 1 à 5 (*articles R et L 4100 à 4500*) qui s'appliquent.

Citons quelques grands points sur lesquels porte la réglementation :

- Les conditions préalables pour l'accès à l'utilisation de radio-isotopes ;
- Les principes de radioprotection (justification, optimisation...) et leurs cas particuliers pour les populations à risque (femmes enceintes...) ;
- **L'évaluation des risques ;**
- La désignation de CRP et PCR ;
- **Le classement du personnel « exposé » par catégories** et leurs implications ;
- **La classification et signalisation des zones de travail impliquant de la radioactivité ;**
- **Le suivi en médecine du travail des personnels exposés ;**
- **La formation et l'information des travailleurs (radioprotection, certificats d'aptitude...)** ;
- Les divers contrôles métrologiques et techniques des équipements et locaux de travail ;

- **Les modalités de contrôle des expositions par dosimétrie ;**

Citons quelques évolutions importantes récentes de la réglementation :

- L'intégration du risque radon ;
- La création du statut de « conseiller en radioprotection » (CRP) et définition de ses missions ;
- **La modification des règles de zonage** (voir 1.2.2.2.) ;
- Des nouvelles modalités pour les contrôles techniques initiaux et périodiques ;
- **La création d'un seuil « public » pour les expositions des extrémités ;**
- La modification des seuils maximum d'exposition professionnelle quant à la dose équivalente cristallin (applicable en 2023, régime de transition en attendant)
- **La création d'une limite d'exposition « extrémités » pour le public ;**
- **La notion d'évaluation « individuelle » de l'exposition est renforcée ;**
- La création d'un régime d'autorisation simplifié dénommé « enregistrement ».

1.2.1.4. LES INSTANCES

La loi 2006-686 du 13 juin 2006 relative à la transparence et à la sécurité nucléaire (22) dite loi « TSN », est à l'origine de la création de l'autorité de sûreté nucléaire (ASN), qui est une entité indépendante et opère, au nom de l'Etat, la gestion de la sûreté nucléaire, de l'information du public et de la radioprotection en France pour protéger les Hommes (salariés, patients, public...) et l'environnement du risque radiologique. Elle participe à l'élaboration de la réglementation, réalise des contrôles (infrastructures, transport, gestion des déchets...) avec pouvoir d'injonction et de sanction, assiste l'Etat en cas de situation d'urgence, instruit les dossiers de déclaration, d'enregistrement (...) des structures voulant user de radio-isotopes.

Depuis le décret de juin 2018, c'est le COFRAC (et non plus l'ASN) qui délivre les agréments aux organismes de dosimétrie. L'ASN collabore avec l'institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN), dont les missions d'expertise et de recherche sont définies par le décret 2016-283 du 10 mars 2016 (23) comme suit : la gestion de l'inventaire et des mouvements des sources radioactives, le contrôle des matériaux nucléaires, la gestion et l'exploitation des enregistrements de dosimétrie des

travailleurs via la base de données nationale «**Système d'Information de la Surveillance de l'Exposition aux Rayonnements Ionisants** » (**SISERI**), la surveillance radiologique de l'environnement. En effet, tous les résultats de suivi dosimétrique individuel réglementaire sont envoyés, centralisés et conservés dans SISERI (24). Les conditions d'accès aux données sont réglementées (25–28): les dosimétries passives sont accessibles nominativement aux médecins du travail et CRP, de manière anonyme aux employeurs. Les dosimétries internes sont accessibles au médecin du travail mais seulement de manière conditionnelle au CRP. Enfin, tout travailleur peut demander à avoir accès à ses résultats dosimétriques. ASN et IRSN ont aussi vocation à réaliser des actions de recherche en radioprotection.

1.2.1.5. PREALABLES A L'UTILISATION DE RI

Avant même le début de la mise en place d'une installation mettant en œuvre des radioéléments (détention ou utilisation, naturels ou artificiels, directement ou indirectement...), une déclaration, un enregistrement voire une demande d'autorisation (fonction des seuils, nature des sources, utilisation faite...) auprès de l'ASN est nécessaire (29), qui cadrera les limites d'activité (Bq) et de volume de stock pouvant être mis en jeu pour chaque RN. Ces dossiers doivent être renouvelés périodiquement et si l'utilisation faite de la radioactivité change.

La nouvelle réglementation de juin 2018 (30) requiert pour l'employeur, dès lors qu'une activité susceptible d'exposer à la radioactivité est mise en œuvre, la nomination d'un « conseiller en radioprotection » (CRP), qui peut être une personne physique de l'entreprise (une Personne Compétente en Radioprotection -PCR-) ou une fonction « sous-traitée » à une personne morale, dénommée dans ce cas organisme certifié en radioprotection (OCR). Ce CRP sera le référent de l'organisation de la radioprotection dans la structure. Pour pouvoir prétendre à sa désignation, une PCR doit avoir suivi une formation par un organisme certifié, valable 5 ans.

Dans les laboratoires de notre étude, l'« employeur » au sens réglementaire, avec les responsabilités qui lui incombent, est le Directeur d'Unité (DU). En pratique, dans notre structure, un CRP est désigné dans chaque unité de recherche, celui-ci étant le plus souvent une PCR, réglementairement désignée par le directeur d'unité (DU) parmi le personnel de l'unité, après

consultation des comités et/ou du conseil de laboratoire compétents. Les missions des PCR dans les laboratoires de notre étude sont énoncées comme tel :

« La PCR conseille et assiste le directeur d'unité dans les tâches suivantes :

- L'élaboration du dossier d'autorisation ;
- La définition des zones et des règles particulières qui s'y appliquent ;
- **La classification du personnel ;**
- L'établissement de consignes, y compris en cas d'incident ou d'accident ;
- L'établissement des fiches individuelles d'exposition aux rayonnements ionisants (FIERI).

Sous la responsabilité du directeur d'unité, elle est chargée :

- De la formation du personnel ;
- **De l'évaluation préalable des expositions des agents ;**
- **Du choix des mesures de prévention et de contrôle (dosimétrie, matériel de détection, stockage, protections collectives et individuelles) ;**
- De la tenue à jour du registre de commande des produits, et de l'inventaire des sources ;
- D'apporter son concours pour les contrôles périodiques internes imposés par la réglementation sur les installations et le matériel.

Elle apporte son concours pour la gestion des déchets et effluents radioactifs. Elle a accès au système d'information de la surveillance de l'exposition aux rayonnements ionisants (SISERI), géré par l'IRSN, pour consulter les doses efficaces des agents exposés, en vue d'optimisation et, le cas échéant, pour transmettre les résultats de la dosimétrie opérationnelle. »

Son rôle est donc polyvalent : conseil, appui, exécution et supervision...

1.2.2. DEMARCHE DE PREVENTION (2–4,16,18,31)

1.2.2.1. EVALUATION DU RISQUE

Rappelons la démarche globale de prévention des risques en matière de santé et sécurité au travail : évaluer le risque, puis, autant que faire se peut l'éliminer ou le substituer ; à défaut mettre en

place des protections collectives en cas de risques « résiduels » et enfin si nécessaire des mesures de protection individuelle. La formation et l'information ont leur place durant toutes les étapes. La prévention doit être intégrée le plus en amont possible. Ces démarches se déclinent bien entendu dans le cadre de la radioprotection. Les risques radiologiques à considérer sont d'une part l'exposition externe/interne, mais aussi les interactions avec les autres risques de l'environnement de travail (réactions chimiques, incendie, explosion, ventilation...) qui pourraient précipiter un accident radiologique. Eu égard à la thématique de notre étude, nous décrivons surtout la réglementation en matière d'évaluation du risque, en particulier via la dosimétrie.

Avant toute mise en fonction de structure utilisant les RI et avant toute nouvelle affectation au poste d'un travailleur susceptible d'y être exposé, l'évaluation du risque radiologique est une obligation pour l'employeur (32–35). Cette approche graduée est déléguée réglementairement au CRP (36). Les objectifs sont multiples : identifier les sources et caractéristiques de l'exposition, s'assurer que les VLEP des RI ne sont jamais dépassées, définir les moyens de protection collectifs et individuels à mettre en place, définir l'exposition prévisible des travailleurs concernés et leur classification, le plan d'action et les moyens nécessaires en cas de situation anormale (...).

Dans cette évaluation, sont pris en compte (37) notamment les informations techniques et physiques sur les sources de rayonnement, les EPC et EPI déjà en place, l'interaction du risque radioactif avec les autres risques (biologiques, chimiques...) et les incidents « raisonnablement prévisibles » (à l'exclusion donc des situations d'urgence radiologique).

Dans le cas particulier de l'évaluation de l'exposition prévisionnelle d'un travailleur, le calcul doit exclure les expositions liées (38) :

- A des RN contenus dans l'organisme humain ;
- Au rayonnement cosmique régnant au niveau du sol ;
- Aux RN présents dans la croûte terrestre non perturbée ;
- Aux examens médicaux auxquels ils sont soumis ;

- A l'exposition des travailleurs autres que les équipages aériens ou spatiaux, au rayonnement cosmique au cours d'un vol aérien ou spatial.

Le démarche d'évaluation doit comprendre en 1^{er} lieu une étude documentaire (données fournisseur, retours d'expérience, simulations...) avec une étude de terrain. ***Si sur ces éléments une exposition au-delà des seuils du public ne peut être exclue, l'évaluation doit être affinée par des mesurages au poste de travail.*** Si ceux-ci infirment un risque d'exposition au-delà de ces seuils, la démarche s'arrête là. En revanche, lorsque les résultats de l'évaluation des risques mettent en évidence que l'exposition des travailleurs est susceptible d'atteindre ou de dépasser les limites d'exposition publiques (39), cela déclenche pour l'employeur l'obligation de déployer tous les éléments règlementaires de la démarche de radioprotection (voir figure 9), en particulier : la mise en place des mesures de radioprotection préconisées, une signalisation du risque (zonage), ***la classification des salariés (...).***

Des contrôles périodiques (en particulier en cas de modification de l'activité), ***remontées d'information de terrain, visites de postes (...)*** ont lieu par la suite, pouvant remettre en question les ***conclusions de l'évaluation initiale.*** Les comptes-rendus sont à disposition du médecin du travail et du CRP et doivent être consultables au moins 10 ans. Ces informations peuvent avoir leur importance pour le médecin du travail pour statuer sur une aptitude médicale au poste (exemple d'un opérateur devant porter des appareils respiratoires isolants contraignants pour pénétrer dans certaines zones, nécessitant une réserve pulmonaire suffisante).

De manière synthétique, nous avons décrit l'algorithme de la radioprotection dans la figure 9. A gauche, il s'agit de l'évaluation des risques a priori et à droite de tous les items de la démarche de radioprotection dont la mise en œuvre est déclenchée quand l'évaluation des risques ne permet pas d'affirmer que les seuils d'exposition du public ne sont pas dépassés. Nous décrivons ensuite (1.2.2.2. sqq) un peu plus en détail certains de ces items.

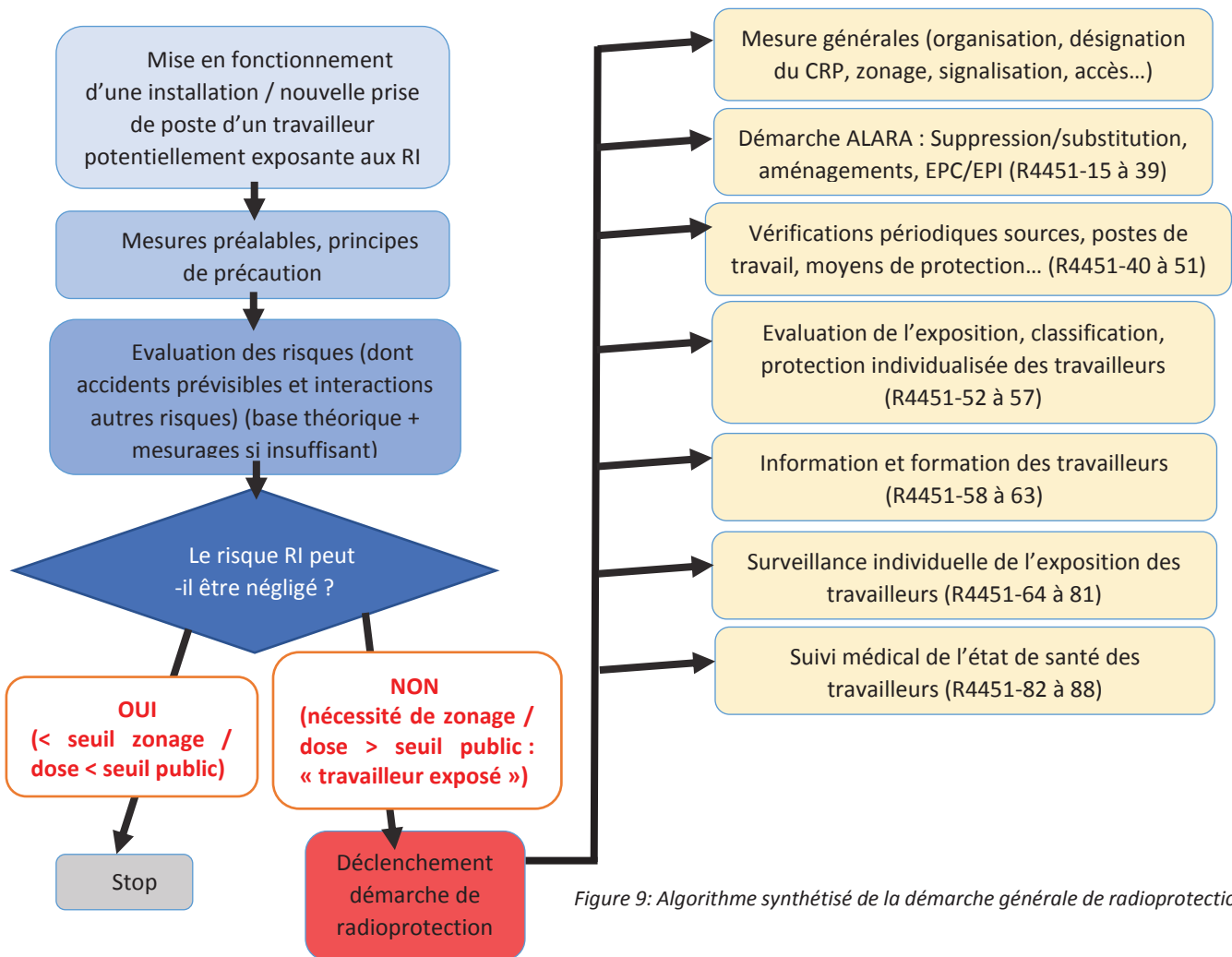


Figure 9: Algorithme synthétisé de la démarche générale de radioprotection

1.2.2.2. EPC, EPI ET SIGNALISATION DU RISQUE AMBIANT

Quand un risque persistant lié aux RI est identifié après évaluation, à défaut de pouvoir supprimer le risque radiologique, des EPC et EPI adaptés à la nature des rayonnements doivent être mis en place. Dans le cas de la manipulation de ^{32}P en biologie moléculaire, les principaux EPC seront les contenants blindés et écrans plexiglas, et, dans les quelques rares cas où c'est nécessaire, l'adjonction d'une hotte voire le travail en boîte à gants. Les EPI seront constituées de gants nitriles, blouses et lunettes de laboratoire. Ils constituent une barrière pour prévenir une contamination cutanée mais ne stoppent pas les rayons β (ils les atténuent toutefois quelque peu).

L'espace de travail doit être délimité en zones, bien identifiées et signalées, par niveau d'exposition, permettant une hiérarchisation des risques. Pour chaque seuil, il y a des obligations particulières quant aux règles d'hygiène, de nettoyage, de sécurité (...). La figure 10 en résume les dispositions légales (40).

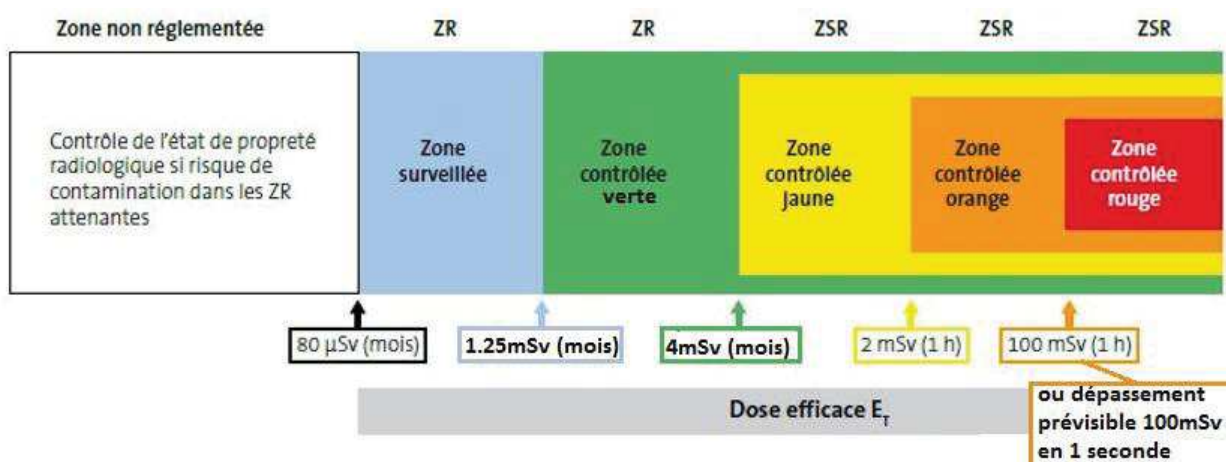


Figure 10: Schématisation du zonage en radioprotection (1, mis à jour)

Voici quelques considérations complémentaires sur le zonage en radioprotection (18,31) :

- 1) Ces dispositions doivent le cas échéant être **complétées par un zonage régional « Extrémités » si la dose équivalente reçue est >4mSv/mois** (41).
- 2) **Le zonage est révisable en fonction de l'évolution des activités, des métrologies ou d'éventuels incidents et doit faire l'objet d'une mise à jour périodique.**
- 3) Le zonage se fait **en considérant les conditions normales de travail comprenant l'atténuation liée aux EPI/EPC et en prenant en compte un risque accidentel « raisonnablement prévisible », l'interaction des RI avec les autres risques professionnels, le local de travail devant être considéré comme occupé en permanence en cas d'activité régulière (dans le cas contraire, des dispositions particulières s'appliquent).**
- 4) **Pour un travailleur non classé, l'accès en zone surveillée ou au-dessus est possible si il dispose d'une autorisation de l'employeur, si l'évaluation du risque individuel a montré une exposition prévisionnelle < seuil public et si des « moyens appropriés » ont été mis en place pour s'assurer qu'il ne dépassera pas ce seuil** (42). Cela se traduit au minimum par une information et le plus souvent par le port de dosimètre « visiteur » passif voire opérationnel, celui-ci devenant obligatoire à partir de la zone contrôlée verte.

- 5) Pour les zones contrôlées et extrémités, l'employeur doit préalablement et individuellement définir des « contraintes de doses » sur une durée déterminée (43) pour chaque salarié. Ces valeurs sont des « objectifs » internes à l'entreprise, nécessairement inférieures aux VLEP mais non contraignantes vis-à-vis des autorités. Les mesures sont vérifiées par dosimétrie, avec analyse pour optimisation mais non transmises à SISERI.
- 6) L'employeur est tenu de procéder à des mesurages de rayonnement sur toutes les sources de RI et des mesurages d'ambiance des zones surveillée et contrôlées. Selon les cas, des dispositifs d'alarme et de protection doivent être mis en place, contrôlés et entretenus par le CRP. Des mesurages ponctuels doivent avoir lieu en cas de suspicion de contamination.

1.2.3. LE SUIVI DES TRAVAILLEURS

1.2.3.1. LE POINT DE VUE REGLEMENTAIRE

Il existe des limites d'expositions réglementaires aux RI pour le public, définies comme tel : 1 mSv en dose efficace (corps entier), 50 mSv en dose équivalente peau (sur tout cm²), 50 mSv en dose équivalente extrémités (mains, avant-bras, chevilles, pieds) et 15mSv en dose équivalente cristallin.

Les limites professionnelles s'appliquent à tous les travailleurs (y compris les travailleurs indépendants) définis en ces termes par le Code du travail (44) dès lors qu'ils sont classés « exposés ». Dans le cas contraire, ce sont les limites d'exposition du public qui leurs sont appliquées. Un travailleur est considéré « exposé » aux RI au sens juridique ***s'il est susceptible, après évaluation individuelle, de dépasser les seuils d'exposition du public.***

Pour les professionnels, les limites sont respectivement de 20 mSv, 500 mSv, 500 mSv et 20mSv (depuis le décret de juin 2018, 150 avant) (45). Si une exposition dépassant ces seuils est retrouvée, l'organisme de dosimétrie concerné en informe immédiatement le médecin du travail du salarié et SISERI (46). L'employeur, en collaboration avec la PCR et le médecin du travail, doit alors stopper sans délai l'exposition aux RI et mettre en place un ensemble de mesures prévues par le Code du travail.

Entre les valeurs limites d'exposition du public et des professionnels, 2 fourchettes d'exposition sont considérées. La plus haute fourchette de dose (corps entier, extrémités, peau ou cristallin) dans

laquelle un travailleur exposé est susceptible de se trouver définira sa catégorisation « A » ou « B » (voir figure 11) (47). Elle ne peut être initialement (avant la prise de poste) que prédictive. **Elle pourra ensuite être révisée empiriquement par le suivi dosimétrique réel, des études de poste complémentaires et de nouvelles évaluations préliminaires en cas de changement de poste ou de conditions de travail.** Tout travailleur exposé doit être formé à la radioprotection et informé sur les risques de son poste de travail (coordonnées du CRP, zonage, règles d'accès, bonnes pratiques d'usage, moyens de prévention...). Une liste minimale des points à aborder est définie réglementairement (48) et doit être renouvelée au moins tous les 3 ans (49). L'employeur est responsable de cette information et de l'organisation de la formation à la radioprotection. **Un complément d'information est à réaliser par les services de santé au travail au décours notamment des visites périodiques.**

Quelques cas particuliers existent :

- Pour les jeunes travailleurs (16-18 ans, sous réserve d'y être autorisés pour les besoins de leur formation) les limites sont respectivement de 6 mSv, 150 mSv, 150 mSv, 15 mSv (50) ;
- Pour les femmes enceintes, la dose équivalente au fœtus doit rester inférieure à 1 mSv, de la déclaration de la grossesse à l'accouchement (51);
- Pour les femmes allaitantes, il est interdit de les maintenir ou de les affecter à un poste de travail entraînant un risque d'exposition interne ;
- Les travailleurs sous contrat à durée déterminée ou intérimaires relèvent de dispositions particulières (52) avec application d'un prorata temporis (53) ;
- En situation d'urgence radiologique, la dose efficace totalisée sur la vie entière d'un travailleur intervenant ne doit pas dépasser 1 sievert (54).

Voici en figure 11 un tableau récapitulatif des seuils définissant les catégories A et B (47).

Note : La classification B ou A vaut pour autorisation d'accès en zones surveillée/contrôlée (à laquelle peuvent s'ajouter des autorisations/interdictions « locales »).

	Corps entier (dose efficace)	Extrémités (mains, pieds...) (dose équivalente)	Peau (dose équivalente sur tout cm ²)	Cristallin (dose équivalente)
Travailleur exposé catégorie A	>6mSv et <20mSv	>150mSv et <500mSv	>150mSv et <500mSv	>15mSv et <20mSv
Travailleur exposé catégorie B	6 mSv au plus (et dépassant 1mSv, pour être considéré comme « travailleur exposé »)	150 mSv au plus (et dépassant 50mSv, pour être considéré comme « travailleur exposé »)	150 mSv au plus (et dépassant 50 mSv/an pour être considéré comme « travailleur exposé »)	>15mSv et <20mSv
Public (non classé)	<1mSv	<50 mSv	<50 mSv	<15mSv

Figure 11: Classification des travailleurs en fonction de leur exposition

1.2.3.2. LA DOSIMETRIE INDIVIDUELLE (19,20)

L'employeur doit mettre en œuvre une surveillance dosimétrique individuelle appropriée pour tous les travailleurs classés « exposés » après leur évaluation des risques (55). Certains cas particuliers existent (travailleurs non classés cheminant en zones contrôlées/surveillées...).

Pour cette population « exposée », cette dosimétrie doit être mise en place si les rayonnements considérés sont susceptibles de présenter une énergie supérieure à 15keV (rayons X et γ), 25meV (rayons neutroniques) ou une énergie moyenne supérieure à **100keV (rayons β)** (20). En dessous de ces seuils, les dosimètres de routine ne détectent plus le rayonnement (et on admet un risque sanitaire négligeable). **Ainsi, un opérateur catégorisé « exposé » et manipulant du ^{32}P (énergie moyenne 700keV) relèverait de l'obligation de dosimétrie (mais pas un manipulateur de ^{32}P « non exposé »).** A noter qu'en pratique, après atténuation par les EPC/EPI, les personnels exposés au ^{32}P le sont à des gammes d'énergie bien inférieures à 700keV.

Cette surveillance dosimétrique est individuelle, nominative. Elle est réalisée par un organisme de dosimétrie accrédité au moyen de dosimètres à lecture différée (aussi appelés dosimètres passifs) ; ces dosimètres devant être « **adaptés** ». (56). Dit autrement, le choix du dosimètre doit être cohérent avec les **caractéristiques des rayonnements ionisants auxquels sont susceptibles d'être exposés les travailleurs, notamment à leur énergie et leur intensité, ainsi qu'aux parties du corps exposées (corps entier, peau, cristallin ou extrémités)**. **Antérieurement, un dosimètre de référence (le plus souvent de poitrine) était demandé quoi qu'il arrive, mais cette notion a disparu dans les nouveaux textes. Il n'est donc plus nécessaire d'avoir au minimum un dosimètre de poitrine et un suivi peut, quand c'est**

plus pertinent (notamment sur les postes n'exposant pas le corps de manière homogène) n'être réalisé que par un dosimètre d'extrémité. Dans les instituts de notre étude, les dosimètres passifs de poitrine sont analysés de manière centralisée en interne via un laboratoire accrédité. Dans les autres cas (dosimétrie bague, radiotoxicologie urinaire...) ces examens sont extériorisés (IRSN...).

Les travailleurs classés en catégorie A ont une durée de port des dosimètres avant lecture d'un mois au maximum (contre trois mois en catégorie B)(46) (cette périodicité pourrait néanmoins être aussi portée à 3 mois dans certains cas dans les prochaines évolutions règlementaires). Les résultats sont conservés au moins 10 ans et sont exprimés, en mSv, dans la grandeur opérationnelle (pondération) appropriée. Pour l'organisme entier et le cristallin la plus petite dose professionnelle mesurée (après déduction de la radioactivité naturelle) ne peut être supérieure à 0,10 mSv (c'est le « **seuil d'enregistrement** ») et le pas de mesure ne peut être supérieur à 0,05 mSv. Pour les extrémités et la peau, ces valeurs sont respectivement de 0,50 mSv et 0,10 mSv. Toute valeur inférieure au seuil d'enregistrement du dosimètre est considérée comme nulle et transmise comme telle (0mSv) à SISERI. La valeur réelle sera contenue entre 0mSv et le seuil d'enregistrement, mais l'imprécision de mesure sera trop importante pour proposer une valeur fiable, une mesure précise n'étant de toutes manières pas nécessaire d'un point de vue sanitaire (ni règlementairement demandée) eu égard aux gammes de valeurs extrêmement faibles considérées.

Des dosimètres témoins, exclusivement destinés à cet usage mais exploités de la même manière que les autres, doivent être placés judicieusement dans les locaux de travail afin d'être représentatif de la valeur de la radioactivité naturelle ambiante. Les résultats des doses des travailleurs sont exprimés après déduction de celle-ci ou, à défaut, par « *toute autre méthode d'évaluation précisée dans le dossier d'accréditation et tracée lors de la transmission des résultats à SISERI* ».

Les dosimètres sont portés sous les EPI au plus près de l'organe ou du tissu exposé (exemple dans la poche de blouse à la poitrine pour l'évaluation de la dose efficace, sous les gants pour la dose extrémité...). Quand plusieurs dosimètres sont portés et évaluent la même grandeur (exemple port simultané d'un dosimètre bague à chaque main), ***l'organisme de dosimétrie transmet à SISERI la valeur la plus élevée.***

1.2.4. MESURAGE DES RI : LE POINT DE VUE TECHNIQUE (46)

1.2.4.1. DIFFERENTS TYPES D'APPAREILS DE MESURE

Il existe d'une part des appareils capables de mesurer l'ensemble des rayonnements (au-delà d'une certaine énergie minimale) et d'autre part des appareils spécifiques à un ou plusieurs types de rayonnements. Pour le contrôle des surfaces ou atmosphères, des appareils portatifs peuvent réaliser ces mesures en les traduisant en dose (les radiamètres, en mSv) ou en activité (contaminomètres, en MBq). Des détecteurs fixes sous forme de balise/alarme sont également disponibles. Des prélèvements (surfaciques...) peuvent renseigner l'activité ponctuelle d'un échantillon à un instant T.

Pour la dosimétrie de personne, les appareils peuvent afficher un débit de dose en temps réel (dosimètre opérationnel) ou être à lecture différée (dosimètre passif). Une contamination interne ne pourra s'évaluer que via une radiotoxicologie sanguine et/ou des excréta (urines, mouchage...) rapportée à la demi-vie effective du RN dans l'organisme, ou par anthroporadiométrie. Ces examens sont prescrits par le médecin du travail, qui conserve le secret des résultats (mais ils peuvent être transmis au CRP dans certains cas).

1.2.4.2. METHODE DE DETECTION ET LIMITES TECHNIQUES

Concernant la dosimétrie passive individuelle réglementaire, il va s'agir de donner une valeur aux « doses équivalentes » ou à la « dose efficace ». Son intérêt 1^{er} est de vérifier que les expositions demeurent proche des valeurs prévisionnelles (fourchette de valeurs selon la classification A ou B) et en tout état de cause inférieures aux VLEP et les plus basses possibles. En cas de divergence entre les valeurs prédictives et celles mesurées, la dosimétrie peut être un « signal d'alarme » imposant une enquête. Cette mesure n'est toutefois qu'indirecte : le dosimètre passif « stocke » des indicateurs du passage d'un rayonnement ionisant et doit être « lu » en laboratoire pour en extrapoler la dose l'ayant traversé. De plus, chaque type de dosimètre passif possède des limitations techniques. La précision des mesures n'est demandée réglementairement qu'au-dessus d'une certaine gamme d'énergie et d'une certaine gamme de dose (norme CEI 62387 : 2012). En dessous de ces seuils réglementaires, la précision des mesures n'a plus à être assurée par le constructeur (les dosimètres peuvent toutefois

être utilisés, mais ce recul doit être pris sur les résultats). A titre indicatif, pour les dosimètres poitrine en rayonnement β , la précision doit être garantie pour des énergies entre 100keV et 3MeV et des doses entre 0.05mSv et 10Sv (pour les bagues : au-dessus de 0.8MeV et entre 0.8 et 500mSv).

La valeur indiquée ne correspond qu'à ce qui a été « vu » par le dosimètre, et n'est qu'une approximation de la dose réellement reçue par le travailleur. Une « lecture critique » est à réaliser sur la base des résultats affichés. Un certain nombre de facteurs peuvent en effet biaiser les résultats en plus (contamination du dosimètre, stockage dans une ambiance contaminée...) ou en moins (***dosimètre porté à un endroit non représentatif ou mal orienté, dosimètre non adapté pour un type de rayonnement...***). Enfin, la valeur affichée par un tel dosimètre correspond à la dose cumulée perçue pendant la durée de port, c'est un chiffre brut qui ne permet pas d'extrapoler la cinétique de ce qu'a été l'exposition au cours du temps ni d'isoler la date d'un éventuel accident d'exposition.

Les dosimètres individuels passifs peuvent être de 2 principaux types :

- **Thermoluminescents (TLD)** : les plus fréquents, qui peuvent détecter les rayons X, β et γ . Sous forme de dosimètres corps entier ou d'extrémité, ils utilisent des matériaux qui subissent des modifications quand ils sont soumis à une irradiation. Leur lecture se fait par chauffage de la plaque de détection, qui émettra alors de la lumière proportionnellement à la dose reçue.
- **Radio-photo-luminescents (RPL)** : en cas de passage de RI, des électrons sont arrachés à la structure de verre du dosimètre et sont piégés par des impuretés qui y sont contenues. La lecture se fait sous lumière UV qui désexcite les électrons avec émission d'une luminescence proportionnelle à la dose reçue.

Trois types principaux de dosimètres passifs individuels existent : les dosimètres de poitrine, les dosimètres d'œil et les dosimètres d'extrémité (bague ou poignet), mesurant respectivement la dose efficace (+/- dose équivalente peau), la dose équivalente cristallin et la dose équivalente extrémités.

Les dosimètres opérationnels utilisent des méthodes de détection électroniques, différentes selon le type de rayonnement. Ils doivent être pourvus de dispositifs d'alarmes sonores et visuels. A part,

des dosimètres particuliers existent pour le monitoring de l'exposition aux rayonnements neutroniques.

1.2.4.3. GRANDEUR D'EXPRESSION DES RESULTATS

En dosimétrie individuelle, les valeurs de doses sont exprimées avec des pondérations différentes : hp10 (corps entier), hp0.07 (peau, extrémités) et hp3 (cristallin). Ces chiffres correspondent à une modélisation de la distance (en millimètres) qui a au moins été parcourue dans l'organisme. 1mSv hp10 n'est ainsi pas égal à 1mSv hp0.07.

Les dosimètres de poitrine modernes (dont ceux de notre étude) comprennent plusieurs filtres successifs dans leur cellule de détection, aux propriétés de capture différentes. En particulier, les deux premiers sont conçus pour stopper les rayons peu pénétrants (dont les β). Le 3^e, en métal, ne peut pas être traversé par les rayons β . Selon le profil d'impaction, le logiciel d'analyse des données est capable d'estimer la nature et la contribution de divers types de rayons dans l'irradiation globale et donc la pondération à utiliser. Voici quelques exemples (volontairement très schématiques, la réalité étant plus complexe) pour comprendre notre étude :

- Si la lecture du dosimètre révèle que seuls les 2 premiers filtres sont impactés, le logiciel « déduit » qu'il s'agit d'un rayonnement β , et attribuera la pondération hp0.07 à la valeur mesurée, qui sera alors considérée comme la dose « équivalente peau » : rayons parcourant dans l'organisme plus de 0.07mm (dépasse la couche cornée de l'épiderme) mais moins de 10mm (n'atteint pas les organes profonds).
- Si la lecture révèle que les filtres derrière le 3^e ont aussi été impactés, le logiciel déduira qu'il s'agit de rayons pénétrants (X ou γ selon le profil) et attribuera la pondération hp10 à la valeur mesurée, considérée donc comme une dose « efficace » (corps entier) (rayonnements pénétrants, en tout état de cause parcourant au moins 10mm dans l'organisme).

Le ³²P est une RN β relativement énergétique. A ce titre, en exposition externe et du point de vue biologique, une probabilité non nulle de pénétration jusqu'à 10mm de profondeur dans l'organisme existe, mais uniquement pour ses rayons les plus énergétiques (qui ne représentent qu'une infime

partie de son spectre de rayonnement) et à condition que ceux-ci n'aient pas été trop atténués sur leur trajet avant de toucher la peau. Autrement dit, cette possibilité n'existe presque exclusivement qu'en cas de contamination cutanée directe. Du point de vue technique, en conditions de travail, les rayons du ^{32}P (même les plus énergétiques) ne dépassent pas le 2^e filtre, donc sont toujours lus en pondération hp0.07. Dans des cas extrêmes seulement (contamination directe et prolongée de la cellule de détection du dosimètre par une solution de ^{32}P , évolution en atmosphère hautement contaminée au ^{32}P ...), certains rayons du ^{32}P pourraient en théorie atteindre le 3^e filtre (mais pas le dépasser). A la lecture de ce dosimètre, le logiciel d'analyse (qui est « prévenu » que les manipulations prévues concernent le ^{32}P) détecterait toutefois une anomalie, ce qui se traduirait par une enquête pour rechercher un éventuel accident d'exposition. Cette valeur serait considérée comme un accident et non pas une exposition en pondération hp10.

Au total, pour le suivi dosimétrique de poitrine de routine lors de la manipulation de RN β (dont le ^{32}P), la dose efficace (hp10) n'est pas informative. La valeur à considérer sur la dosimétrie de poitrine est donc la dose équivalente peau (hp0.07), à condition bien sûr que cet emplacement soit jugé représentatif de l'exposition et que les RN en question aient une énergie de rayonnement $>100\text{keV}$ (afin d'être détectables).

Les bagues ne sont pas équipées de filtres différents. On ne peut pas différencier la nature des rayonnements, les résultats sont exprimés en hp0.07 qu'ils résultent de rayonnements faiblement ou fortement pénétrants et correspondent à la « dose équivalente extrémités ».



Figure 12: Exemples d'appareils de mesure des RI (de G à D: dosimètre passif de poitrine, dosimètre opérationnel de poitrine, dosimètre passif bague, dosimètre passif cristallin, contaminomètre)

1.2.5. LE SUIVI MEDICAL DU PERSONNEL EXPOSE

1.2.5.1. GENERALITES

Les travailleurs classés en catégorie A et B relèvent du Suivi Individuel Renforcé (SIR) (57) et à ce titre de la nécessité de délivrance périodique d'un avis d'aptitude au poste via leur médecin du travail. Leur 1^{ère} visite médicale doit avoir lieu avant la prise de poste, le médecin du travail étant informé de l'évaluation des risques individualisée réalisée par le CRP. Les travailleurs de catégorie B relèvent du SIR « classique » c'est-à-dire qu'ils doivent bénéficier de visites périodiques avec le médecin du travail, celles-ci ne pouvant être espacées de plus de 4 ans et d'une visite intermédiaire au maximum tous les deux ans par un professionnel habilité (médecin du travail, collaborateur médecin, interne, infirmier de santé en travail). Les travailleurs de catégorie A doivent règlementairement bénéficier d'une visite annuelle réalisée par le médecin du travail.

Les missions du MDT en matière de radioprotection sont multiples : assurer le suivi médical des travailleurs exposés, effectuer des études de postes, prescrire des adaptations de poste mais aussi des EPI et/ou des restrictions d'activité, organiser le suivi post exposition aux RI, participer aux discussions entre les acteurs de la radioprotection pour la mise en place d'aménagements collectifs et actions d'amélioration des conditions de travail (...). Il a accès à l'ensemble des locaux et est accompagné dans ses missions par des infirmiers/ères et assistant(e)s de Santé au Travail.

Dans notre structure d'étude, les agents catégorisés A ou B relèvent du « Suivi Médical Particulier » qui est un équivalent du SIR dans la fonction publique d'Etat. Par ailleurs, les agents sont vu en consultation dans le cadre d'un service autonome interne à la structure par un Médecin de Prévention (MP), qui est l'équivalent du MDT dans la Fonction Publique d'Etat, dont les missions recouvrent celles sus-citées, la forme pouvant toutefois parfois différer. Par exemple il ne se prononce pas sur l'aptitude aux fonctions de l'agent (cette décision relevant du médecin agréé) mais sur la « compatibilité entre son état de santé et le poste de travail » (avec ou sans aménagement).

1.2.5.2. OBJECTIF DU SUIVI MEDICAL

Le suivi médical du personnel exposé catégorisé A ou B a pour but de prévenir et dépister toute affection susceptible d'être secondaire à une exposition aux RI, de rechercher des contre-indications à l'affectation ou au maintien à un poste exposant aux RI(...). Il est assuré à travers différentes visites médicales. Dans le périmètre de notre étude, les agents classés A ou B sont en pratique vus tous les ans par le Médecin de Prévention. Il convient à ces occasions de vérifier les résultats dosimétriques de l'agent, d'interroger sur le poste de travail, d'informer sur le risque professionnel et de réaliser un examen clinique +/- des examens complémentaires orientés :

- Recherche de pathologies susceptibles d'entraîner une rétention de la radioactivité en cas de contamination (insuffisance rénale, cavernes pulmonaires, perforation des tympans...) ou des difficultés de décontamination en cas d'exposition accidentelle (lésions cutanées étendues...) ;
- Dépistage de maladies radio-induites (cancers cutanés, hématologiques, atteintes oculaires...) ;
- Recherche de contamination ou de complication immédiate en cas d'accident.

Le médecin de prévention a aussi vocation à conseiller l'agent en matière de reconnaissance des accidents de service/ maladies contractées en service. En dehors d'une irradiation aigue massive (cas rarissime en recherche), il est rare qu'une exposition à des RI provoque une lésion immédiate. Il est en revanche indispensable de déclarer et tracer dans le dossier médical toute exposition accidentelle à des fortes doses de RI, ainsi que l'historique d'exposition au cours de la carrière, car c'est bien leur évolution potentiellement néfaste à long terme qui en fait la gravité.

1.3. SPECIFICITES SANTE/SECURITE EN RECHERCHE PUBLIQUE

Avant d'aborder la suite de cette étude, il convient de préciser quelques-unes des spécificités des laboratoires de recherche publique sur les aspects de santé et sécurité au travail, qui seront autant de clés de compréhension de notre démarche. Il nous a en effet fallu les prendre en compte notamment pour nos études de poste :

- 1) L'activité est souvent complexe (utilisation de produits/procédés non conventionnels, voire de toxicité non connue) et d'intensité fluctuante : des périodes de manipulation intensive peuvent

laisser place à de longues périodes sans aucune manipulation, consacrées à l'analyse des données. Au sein d'une même phase de manipulations, les modalités d'une manipulation « N+1 » dépendront souvent des résultats de la phase « N » (conformité, quantités, temps de réaction à respecter, commandes de réactifs, manipulations ratées...), ne rendant la réalisation des plannings de manipulation possible qu'à court terme. Le volume d'activité est aussi conditionné par des éléments extérieurs (financements, contrats, contraintes des fournisseurs...). L'activité est évolutive : les mêmes substances chimiques/process ne seront pas utilisés indéfiniment, mais par exemple seulement le temps d'une thèse et/ou d'un protocole de recherche.

- 2) La multiplicité des tutelles pour une même unité de recherche peut amener à une complexification de l'évaluation des risques, des redondances et ou des difficultés à répartir les rôles pour les différentes entités de prévention/sécurité. L'organisation d'une collaboration efficace entre les différents partenaires est indispensable.
- 3) Une part non négligeable des personnels est engagée pour des contrats temporaires (post-doctorants...) avec en conséquence un turnover important. De plus, une certaine partie du personnel, notamment de recherche, est d'origine étrangère et communique essentiellement en anglais, qui reste la langue scientifique internationale. La formation bilingue et adaptée des nouveaux entrants n'en est que plus importante.

2. PRE-ETUDE

2.1. CONSTATS ET JUSTIFICATION DE LA PROBLEMATIQUE

2.1.1. GENESE DE CETTE ETUDE

La problématique explorée dans cette thèse a trouvé sa genèse dans les échanges ayant eu lieu lors d'une réunion pluridisciplinaire médico-technique sur la radioprotection. Nous nous sommes interrogés sur le cas des agents manipulant du ^{32}P sous forme non scellée à des postes de marquages/manipulations de sondes chaudes dans le périmètre d'autorité des services de prévention techniques et médicaux présents. Ces agents étaient depuis des années soumis à un même protocole de suivi standardisé, non individualisé, à savoir une classification en catégorie B avec le port d'un dosimètre de poitrine seul, sans dosimètre d'extrémité. Ce protocole de suivi peut s'expliquer « historiquement » car la réglementation ne prévoyait alors pas de limite d'exposition « public » pour les extrémités, laissant un vide juridique quant à la classification à donner à un travailleur dès qu'une exposition non nulle était suspectée à cet endroit. Or, c'est justement ce que concluaient les études de postes et modèles calculatoires de dose prédictive utilisés par les PCR. Enfin, les mesures de radioprotection étaient antérieurement moins efficaces. Ce protocole avait donc été consenti à l'époque par pragmatisme et principe de précaution. Cette population bénéficie depuis plusieurs années de nouveaux dosimètres multi-filtres, rendant des résultats en dose équivalente peau ($\text{hp}0.07$) en plus de la dose efficace ($\text{mSv hp}10$). Quelle que soit la grandeur ($\text{hp}10$ ou $\text{hp}0.07$) considérée, la lecture de ces dosimètres était toujours strictement négative depuis des années (voir extrait anonymisé en figure 13, à noter l'absence de données « extrémités »).

Résultats des équivalents de doses en mSv, pour la périodicité Trimestrielle (juillet, août, septembre 2018)									
Agent	Temps d'intégration		Organisme entier Hp(10)	Peau Hp(0,07)			Extrémités avant-bras Hp(0,07)		Observations
	Début	Fin	γ, X^*	γ, X^*	β^-^*	γ, X^*	β^-^*		
[REDACTED]	01/07/2018	30/09/2018	0	0	0	-	-		
[REDACTED]	01/07/2018	30/09/2018	0	0	0	-	-		
[REDACTED]	01/07/2018	30/09/2018	0	0	0	-	-		
[REDACTED]	01/07/2018	30/09/2018	0	0	0	-	-		

Figure 13: Extrait de relevé dosimétrique dans notre population d'étude

Ce protocole a néanmoins été jugé « arbitraire » par certaines PCR, déjà bien avant que la réglementation de 2018 ne fixe un seuil d'exposition des extrémités pour le public (50mSv/an). En effet, la connaissance des postes de travail laissant supposer une exposition non nulle bien réelle, et les dosimétries négatives a suscité des doutes sur la représentativité des résultats mesurés. Certains agents exprimaient d'ailleurs une relative « anxiété », ne sachant pas quoi penser de leur exposition réelle. L'hypothèse avancée par ces PCR était que les conditions de travail (EPC...) rendaient l'impaction des dosimètres de poitrine improbable, l'exposition professionnelle étant par ailleurs concentrée aux mains mais non détectable par ceux-ci. Un besoin d'investigations complémentaires était identifié afin de confirmer cela.

Le choix du « focus » sur les biologistes moléculaires manipulant du ^{32}P a plusieurs justifications. Il s'agissait premièrement d'un RN d'usage relativement fréquent dans notre périmètre d'action, permettant de faciliter une future campagne d'inclusion pour une étude, prédisposant à un effectif suffisant. Ensuite, il s'agit d'un « bon » candidat du point de vue de la radioprotection car il constitue l'un des RN les plus pénalisants pour le risque radioactif : rayons β « durs » relativement énergétiques et pénétrants (pour des rayons β). D'une part, cela en fait une cible prioritaire à caractériser pour s'en protéger. D'autre part c'est l'un des rares RN utilisés dans les laboratoires de notre périmètre de prévention présentant une gamme d'émission détectables par les dosimètres usuels. En effet, les émetteurs β « faibles » ($\approx 100/200\text{keV}$, par exemple le ^3H , le ^{35}S ou le ^{14}C ,), en plus de représenter un risque sanitaire négligeable (inexistant en dessous de 100keV), ne sont pas détectés par la plupart des dosimètres d'extrémité. Or, au vu de la configuration préliminaire nous orientant vers un focus sur le « risque extrémité », il semblait évident que de tels dosimètres seraient nécessaires.

Une équipe projet multidisciplinaire de préventeurs médicaux et techniques a ainsi été formée afin de réfléchir sur cette problématique, coordonnée par un interne de MDT et comprenant des MP, membres des services QSE, des PCR et des biostatisticiens.

2.1.2. CADRE DE NOTRE INTERVENTION

La réglementation en matière de RI, nous l'avons vu, impose pour chaque travailleur une évaluation préalable des risques, de laquelle découlera sa classification, son information, son suivi et les aménagements réalisés.

Si ces études préalables sont bien effectuées pour les agents manipulant du ^{32}P dans les laboratoires de biologie moléculaire de notre périmètre d'étude, nous nous sommes interrogés sur leur exhaustivité. Premièrement, les protocoles de suivi nous semblaient être trop reproduits, ne laissant que peu de place à l'individualisation (pourtant demandée par la réglementation). Ensuite, quand l'étude préalable ne permet pas d'exclure une exposition au-delà des seuils du public, elle doit être complétée par des mesurages au poste de travail visant à le confirmer ou l'infirmer. Des mesurages d'ambiance (et les dosimétries poitrines) étaient revenus négatifs, mais aucune campagne de dosimétrie des extrémités n'avait été réalisée. Ce qui amène au dernier point de cet argumentaire : les études de risque sont supposées prendre en compte les caractéristiques du rayonnement (EPC/EPI, topographie d'exposition...) or cela semble avoir été imparfaitement le cas... Elles se sont en effet focalisées sur une exposition corps entier (dont nous avons tenu à questionner la représentativité) en négligeant le risque extrémité. Qu'à cela ne tienne, l'évaluation préliminaire se doit d'être révisée périodiquement par de nouvelles études.

Nous agissons donc dans ce cadre. Cette nouvelle étude périodique vise à pallier le manque de données expérimentales sur l'exposition des mains, en mettant l'accent sur l'individualisation et une meilleure prise en compte des caractéristiques du rayonnement.

Par ailleurs, la réglementation de juin 2018 demande la mise en place d'un certain nombre de nouvelles dispositions (zonage extrémités...) requérant, pour pouvoir y satisfaire, des études de poste et des estimations métrologiques plus ciblées.

Parallèlement, une authentique volonté d'investigation était inscrite dans le plan de prévention pluriannuel de santé au travail 2016-2018 de l'entité de gouvernance des laboratoires de notre étude,

légitimant notre action. Notre volonté n'était bien entendu pas uniquement de répondre à des obligations de mise en conformité réglementaires, mais bien d'œuvrer pour la protection des agents.

Nous avons souhaité lever le voile sur un bon nombre de problématiques, tant dosimétriques qu'organisationnelles et à ce titre ne pas réaliser une « simple » étude de poste, mais bien un travail de fond (comme le démontrera la suite de cet écrit).

2.1.3. METHODE DES RECHERCHES PRELIMINAIRES

Dans le cadre de la pré-étude, afin d'orienter la rédaction de notre protocole de recherche, nous avons souhaité d'une part nous documenter via de la littérature existante sur ce sujet et d'autre part confirmer nos intuitions théoriques via des analyses de postes.

Concernant la recherche bibliographique, les mots clés (équivalent anglais Mesh entre parenthèses) suivants ont été utilisés respectivement sur le moteur de recherche EM Consulte et PubMed, exclusivement dans le titre ou le résumé de l'article, sous différentes associations, en se restreignant aux 20 premiers résultats de chaque recherche, sans limite de date de publication : phosphore 32 (phosphorus 32) / radio-isotope du phosphore (phosphorus radioisotopes) / particule bêta (beta particle) / biologie moléculaire (molecular biology) / dosimètre (dosimeter) / dosimétrie (dosimetry) / radioprotection (radiation protection) / rayonnement (radiation) / comparaison (comparison) / position (position) / bague (ring) / poitrine (chest) / professionnel (occupational) / laboratoire (laboratory). Une recherche plus brève (moteur de recherche différent) a aussi été effectuée sur les publications en ligne de l'IRSN et l'ASN. Pour ce qui est des bases de données d'ingénieurs, de radioprotection et les études de poste internes aux laboratoires de l'étude, une recherche a été déléguée aux ingénieurs et PCR de l'équipe projet, plus familiers de ces supports.

Concernant les études de poste, nous avons souhaité les rendre les plus informatives possibles. A cet effet, plusieurs prérequis s'imposaient. Elles devaient concerner des biologistes moléculaires manipulant du ^{32}P . Les postes étudiés devaient se trouver dans un laboratoire de biologie moléculaire où il serait pertinent d'effectuer notre étude dosimétrique par la suite (donc sous notre périmètre de prévention, avec une activité fréquente de manipulation de ^{32}P et l'aval du DU et de la PCR). Ils devaient

également être représentatifs de l'activité typique et habituelle des biologistes moléculaires : cette condition était estimée par les PCR des laboratoires retenus, après discussion avec les agents potentiellement concernés. Sur ce cahier des charges, il nous était remonté l'information de quand une manipulation éligible allait être réalisée afin que nous puissions venir l'observer. La « checklist » de notre feuille de route sur ces études de postes a été basée sur le guide de bonnes pratiques de l'IRSN (14). Ainsi, les objectifs de ces visites étaient :

- « Identifier la ou les sources de rayonnements » (en particulier les différentes étapes où la source de ^{32}P manipulée n'était plus scellée)
- « Caractériser les champs de rayonnements associés (géométrie, nature du rayonnement, énergie, débit, orientation) » (en particulier la possibilité théorique d'impacter le dosimètre de poitrine dans une telle configuration)
- « Identifier la contamination surfacique ou atmosphérique existante ou potentielle, en précisant la nature des RN et les formes physico-chimiques associées »
- « Identifier et caractériser les éléments présents contribuant à la protection collective »
- « Réaliser un schéma à l'échelle des installations sur lequel sont représentées les sources de rayonnements et les éléments de protection collective »

Tous les éléments ne pourront pas être diffusés ici (notamment les plans des installations).

Plusieurs études de poste ont été réalisées par des membres de l'équipe projet. Un compte-rendu de visite plus détaillé sera présenté en 2.3.3. Celle-ci a été retenue car estimée variée, représentative et illustrant bien la problématique, en cela qu'elle constitue une étape de manipulation utilisant beaucoup d'équipements et illustrant autant de situations potentielles d'expositions de l'agent aux RI, contrairement à d'autres étapes plus « uniformes ».

2.2. ANALYSE DE LA LITTÉRATURE

2.2.1. DONNEES LOCALES

Aucun compte rendu d'étude de poste ni de métrologie visant le risque extrémités sur les postes de travail ciblés n'étaient disponibles dans nos services de prévention médicaux et techniques locaux.

Les seules données présentes étaient des modèles mathématiques de calcul de doses prévisionnelles basés sur l'activité déclarée par les agents. Ces calculs, bien que présentant des résultats à priori rassurants (expositions estimées non nulles mais généralement < seuil de la catégorie B), sont en pratique peu utilisés par les PCR, car contraignants, nécessitant des données exhaustives et jugés imprécis. Dans tous les cas ils n'ont jamais été localement confirmés ni infirmés expérimentalement par des mesures de dose aux extrémités.

2.2.2. DONNEES EPIDEMIOLOGIQUES

Concernant les statistiques générales, citons d'abord quelques données épidémiologiques retrouvées dans la littérature IRSN. Dans le bilan 2017 de l'IRSN (58) on note que l'effectif suivi par dosimétrie d'extrémités (environ 30 000 personnes) représente 8% de l'effectif total (près de 380 000 personnes). Le secteur de la recherche – toute proportion gardée – représente comparativement une exposition cumulée beaucoup moins importante que le secteur médical/vétérinaire (101.09Sv pour 15799 salariés) quand on la rapporte au nombre de travailleurs (0.93Sv pour 1670 salariés). Il s'agit du secteur présentant des salariés suivis par dosimétrie d'extrémités avec la plus petite exposition per capita, comme le montre le graphique suivant (58) :

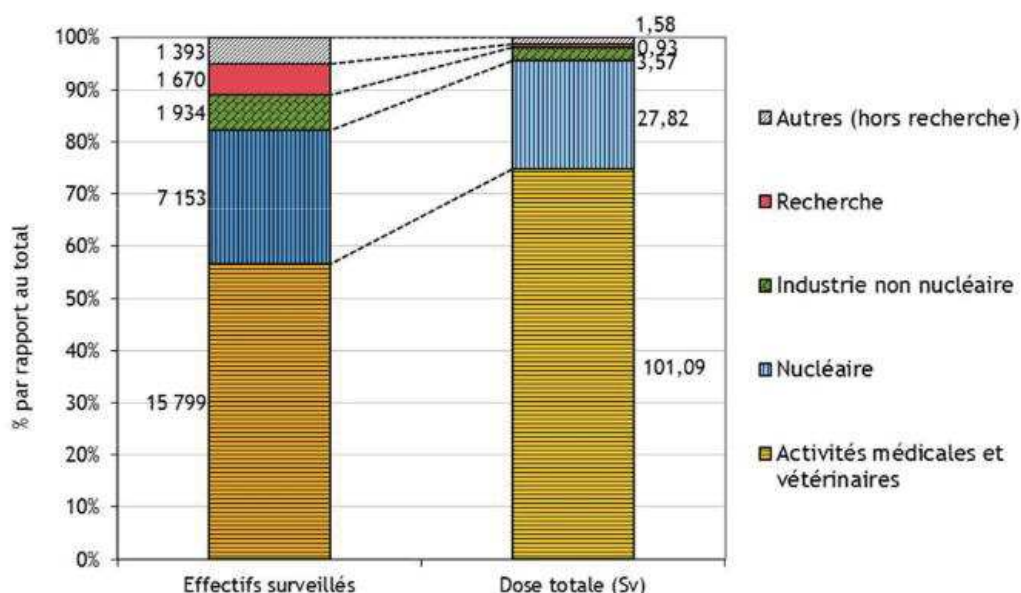


Figure 14: Répartition des effectifs suivis et des doses enregistrées aux extrémités en 2017(chiffres IRSN)

Concernant maintenant le secteur de la recherche, les chiffres 2017 en particulier sont très parlants : sur un effectif de 12117 salariés, près de 90%, tous secteurs confondus, présentent une dosimétrie corps entier négative. Les autres salariés avaient une exposition corps entier située entre

le seuil d'enregistrement et 1mSv/an. Au-delà on ne comptait que 30 salariés, aucun ne dépassant 10mSv/an. Les chiffres d'exposition corps entier globaux dans ce secteur sont en baisse depuis plusieurs années, pour un effectif relativement stable (-15% pour la dose individuelle moyenne par rapport à 2016). Concernant la dosimétrie d'extrémité, 1621 travailleurs étaient suivis en 2017, dont 80% avec des doses en dessous du seuil d'enregistrement. La dose moyenne enregistrée était de 2.5mSv/an (maximum 114mSv/an, donc < seuil extrémité de la catégorie A). 80% de l'effectif « extrémités » est suivi par dosimétrie bague, environ 20% par dosimétrie poignet. Dans le sous-groupe bague, la dose moyenne est de 3mSv, pour environ 80% des mesures en dessous du seuil d'enregistrement. Dans le sous-groupe poignet, la dose moyenne était de 0.31mSv, 90% étant en dessous du seuil d'enregistrement. Aucun dépassement de dose réglementaire n'était retrouvé. Ces chiffres sont résumés dans la figure 15 :

	Total	Recherche
Effectif	380 000	12 000 (3% total)
Corps entier		
Dose moyenne	0,72mSv	0,21mSv
< Seuil d'enregistrement	80%	90%
> 1mSv	4%	0,3%
Extrémités		
% suivi	8%	15%
Dose moyenne	nc	2,5mSv.éq
< Seuil	nc	80%

Figure 15: Statistiques d'exposition aux RI IRSN 2017

Ainsi, sur la base de ces données épidémiologiques 2017, nous pouvons supposer que notre étude allait rapporter des résultats d'exposition aux extrémités très faibles mais potentiellement non nuls, en tout état de cause probablement bien en dessous de la valeur de classification en catégorie B (50mSV/an). La négativité des dosimétries de poitrine des agents de la population cible de notre étude dans la DR10 est cohérente avec les chiffres nationaux.

Une statistique intéressante a été relevée dans une présentation du bilan 2017 de l'ASN secteur recherche (59). L'ASN estime en effet que dans ce secteur, sur l'ensemble des inspections réalisées sur

la période 2015-2017 ($\approx 20\%$ des structures), environ 41% des salariés suivi par dosimétries sont surclassés (catégorisés A alors qu'ils relèveraient d'une catégorie B, ou surtout catégorisés B alors qu'ils ne devraient pas être considérés comme « travailleur exposé »). On imagine bien que cette « surprotection » n'est pas sans impliquer des lourdeurs administratives, protocolaires et financières.

2.2.3. ARTICLES DE RECHERCHE

Citons ensuite ORAMED, groupe de travail européen sur la radioprotection en milieu médical impliquant l'IRSN et ses homologues dans 9 autres pays. La synthèse des résultats de plusieurs de leurs campagnes internationales de recherche et leurs recommandations en conséquence ont été détaillées lors d'un congrès de médecine nucléaire en 2013 (60). Bien qu'ayant été menée exclusivement dans ce secteur et non pas en laboratoires de recherche, leur action présente l'intérêt d'avoir cherché à apprécier le danger réel, potentiellement méconnu, lié à l'exposition des extrémités. 768 mesures de dosimétrie d'extrémité ont été colligées, issues de 7 pays et concernant 189 travailleurs, ciblant la manipulation de 3 RN (^{99m}Tc , ^{18}F et ^{90}Y), au moyen notamment de gants spéciaux avec de multiples dosimètres pastilles intégrés. Certains éléments techniques relevés par les auteurs s'avèrent très intéressants pour notre étude :

- 1) La dose maximale était retrouvée à l'extrémité de l'index de la main non dominante (dose de l'ordre de 6 fois plus importante que la bague de la 1^{ère} phalange, elle-même en moyenne 8 fois plus élevée qu'au niveau du poignet).
- 2) Les auteurs concluaient que la dosimétrie de poignet était sans intérêt, la dosimétrie avec le meilleur ratio « acceptabilité/représentativité » était le port d'une bague sur la phalange proximale de l'index de la main non dominante, cible orientée côté paume de la main.
- 3) Au-delà de 100mSv/an de dosimétrie d'extrémité mesurée, un dépassement ponctuel de la limite réglementaire (500mSV) ne pouvait être exclu.
- 4) En pratique, l'exposition réelle du cm^2 de peau le plus exposé ne peut être connue, mais seulement approximé en appliquant des facteurs correctifs aux mesures faites.

Le secteur de la médecine nucléaire est très différent de celui de la recherche et présente des énergies, volumes, activités, types de manipulation (injections...) bien plus pénalisants. Les observations des auteurs ne sont probablement pas transposables directement à notre population d'étude. En particulier, le facteur multiplicatif de 6 entre les 1^{ère} et 3^e phalanges est peut-être trop important pour nos agents. Nous le retiendrons néanmoins pour la discussion de notre étude (voir 5.2.11.). En revanche, les observations des auteurs quant à la localisation des plus fortes expositions (doigts de la main non dominante) et en conséquence l'inutilité de la dosimétrie de poignet confortaient les conclusions de nos propres études de poste et notre choix de mesurage de l'exposition des extrémités par dosimètre bague.

Concernant maintenant les résultats sur les plateformes de publication médicales, l'immense majorité des résultats retrouvés concernait la radioprotection et/ou la dosimétrie d'extrémités des services de médecine nucléaire ou des blocs opératoires, et non pas des laboratoires de recherche. Pour le ³²P en particulier, les articles retrouvés faisaient surtout état de son utilisation en oncologie mais pas des considérations de radioprotection. Du reste, pour les articles traitant de radioprotection (ne traitant donc pas du ³²P), la majorité du temps il ne s'agissait que d'études de poste sur une période donnée (souvent courte) avec un dosimètre donné (dosimètres bagues chez les chirurgiens...) et le plus souvent en rapport avec l'utilisation du 18-FDG. Aucun article traitant spécialement d'une observation comparative entre dosimétries de poitrine et d'extrémités n'a été retrouvée et très peu suivent des populations sur plusieurs mois. Pour toutes ces différences rendant une transposition des conclusions dans notre population compliquée, et ayant déjà retrouvé des résultats d'article de synthèse international (groupe ORAMED), nous ne citerons que quelques exemples choisis.

Traitant notamment des différences de doses perçues attendues selon la position du dosimètre, une étude menée chez des préparateurs de 18-FDG en médecine nucléaire a démontré une différence significative des résultats dosimétriques (1.6 [1.35-2.07] p = 0.0004) selon que le dosimètre bague fut porté à la 1^{ère} ou la 3^e phalange (61). Une autre étude retrouvait des différences pouvant aller de 12 à 80% selon la géométrie des faisceaux de RI et la position des dosimètres de poitrine dans un groupe de travailleurs pourtant jugé a priori homogène (62). Une publication menée dans un service de

médecine nucléaire au Maroc (63) détaillait une étude de poste menée pour la 1^{ère} fois avec des dosimètres bagues en complément des dosimètres de poitrine, sur différents postes de travail (techniciens, infirmières, personnel de nettoyage...) exposés à divers RN (principalement ^{99m}Tc et ¹³¹I). En lisant entre les lignes (cette réflexion n'était pas détaillée sous cet angle par les auteurs) on remarque que les résultats des dosimétries d'extrémité n'étaient pas du tout liés à la dosimétrie corps entier. Typiquement, alors que les doses efficaces les plus hautes observées étaient à peu près similaires entre les techniciens préparateurs et les infirmières (autour de 2 à 2.5 mSv/an), les doses équivalentes aux extrémités « explosaient » – sans toutefois dépasser de seuils alarmants -pour les techniciens (22mSv/an) par rapport aux autres groupes (entre 1 et 5 mSv). Cette donnée a d'ailleurs fait recommander par les auteurs l'instauration permanente d'un suivi dosimétrique des extrémités pour le groupe des techniciens, leur dosimétrie corps entier n'étant pas prédictive de leur exposition.

Concernant l'interrogation des bases de données non médicales, elle n'a pas retrouvé de résultats pouvant constituer une base de comparaison intéressante, peu voire pas d'études métrologiques ayant été publiées sur les postes de travail ciblés par notre étude.

2.2.4. CONCLUSIONS

Malgré le fait que la manipulation de ³²P soit une situation relativement fréquente en laboratoire de biologie moléculaire, force était de constater que très peu de données chiffrées étaient disponibles concernant l'exposition des extrémités des travailleurs concernés.

Ces résultats renforcent la conviction que :

- D'une part les postes de travail concernés par notre étude sont peu étudiés par les acteurs de la prévention (les pratiques ne semblant d'ailleurs pas être harmonisées) et à ce titre il semble légitime de s'y intéresser plus en détail ;
- D'autre part, une dosimétrie spécifiquement adaptée à chaque activité, tant en termes de type de dosimètre que de localisation, basée sur des études de postes, des connaissances théoriques et des obligations règlementaires, est importante pour garantir le meilleur suivi possible en radioprotection des travailleurs.

2.3. ETUDES DE POSTE PRELIMINAIRES

2.3.1. DESCRIPTION ET RADIOTOXICOLOGIE DU ³²P

Avant de mener nos études de postes, il convenait de mieux connaître notre cible : le ³²P. Voici en résumé sa « carte d'identité » (64) :

- Substance radioactive artificielle obtenue par bombardement neutronique de ³¹P stable
- Demi-vie radioactive : 14.3 jours
- Emetteur β- pur de haute énergie (moyenne 0.7MeV, maximale 1.7MeV) avec comme produit de réaction du soufre 32 stable
- Rayonnement de la famille des particules chargées légères : soumises à une notion de parcours maximal dépendant de leur énergie et du milieu traversé, pénétration faible
- En cas de contamination systémique, tropisme particulier pour l'os (30%) (fixation, élimination par décroissance radioactive), le reste se distribuant aux tissus mous (élimination par métabolisme d'excrétion avec une période biologique entre 12h et 19 jours selon le tissu)
- En recherche, il est largement utilisé pour les activités de marquage en biologie moléculaire de par sa grande énergie, les activités généralement mises en jeu se situant à 700 kBq ; utilisation plus ponctuelle dans d'autres domaines de la recherche pour des réactions de phosphorylation et d'étude de la migration des engrais (phosphates)
- Dans ces gammes d'activité, 8 à 10mm de plexiglas (65) suffisent pour arrêter tous les rayonnements β du ³²P sans risquer de rayonnement de freinage (il n'y aurait nécessité d'adjonction de plomb qu'au-dessus d'une activité d'environ 40MBq)
- En médecine, il a été utilisé dans le traitement de polyglobulies (de plus en plus rare)
- Pas d'utilisation industrielle notable
- Peu volatil en solution aqueuse à température ambiante, risque d'inhalation improbable

2.3.2. POSTE RETENU : CONTEXTE ET PROTOCOLE

Nous présenterons le poste de travail d'un assistant ingénieur dans le laboratoire d'un institut que nous nommerons I1. Cette personne est amenée à manipuler à la paillasse mais elle effectue

également des tâches de compilation de données, d'enseignement et d'accompagnement de stagiaires, de rédaction de protocoles et d'articles de recherche, de gestion des commandes et de dépannage de machines... Comme souvent en recherche, la répartition de son temps entre les manipulations et le travail administratif est très variable. On peut grossièrement estimer que l'agent passe en moyenne au moins 50% de son temps de travail à la paillasse, le pourcentage de temps passé exposé au ^{32}P étant difficile à estimer.

Le laboratoire est spécialisé dans l'étude des ARN non codants (ARNnc), dont le rôle a longtemps été méconnu, notamment celui de leur interaction avec les ARN messagers (ARNm) pour leur permettre de prendre une conformation facilitant l'interaction avec les ribosomes et donc leur transcription en protéines. L'agent effectue la plupart de ses manipulations autour d'expériences visant à vérifier expérimentalement des hypothèses sur les appariements ARNm/ARNnc établies par des modèles prédictifs issus de la bio-informatique. La détection de ces appariements nécessite l'utilisation de sondes marquées au ^{32}P . Ce traceur est en effet suffisamment petit pour pouvoir être fixé à un ARN sans perturber son comportement et tout en restant détectable (les traceurs d'immunohistochimie -non radioactifs- sont par exemple trop gros). Certaines étapes ne présentent normalement pas d'exposition aux RI (1ères étapes du protocole (cf infra), coulage des gels d'électrophorèse, préparation des solutions tampon...). L'expérience observée peut être résumée schématiquement tel que décrit en figure 16.

Une fois les étapes « préliminaires » accomplies (préparation des solutions tampons, des amorces marquées...), ce protocole est généralement réalisé en trois temps répartis sur plusieurs jours. Entre les étapes, les échantillons sont conservés au congélateur ce qui les met en « stase ». L'agent est amené à réaliser régulièrement ce protocole complet, la périodicité étant toutefois impossible à prédire. Les différences entre l'une ou l'autre manipulation peuvent être liées aux concentrations de plomb dans les solutions scindantes simple brin, au type de primer marqué...

L'étude de poste à proprement parler s'est déroulée pendant l'étape N°4 de la figure 16, un vendredi après-midi de 15h à 17h. Le temps de manipulation en tant que tel était d'environ 30 minutes, le reste était consacré à la préparation et au rangement ainsi qu'aux temps de trempage/incubation.


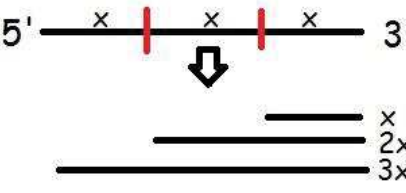
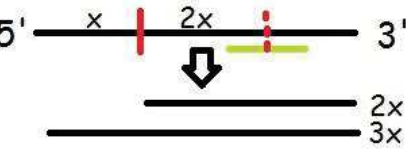
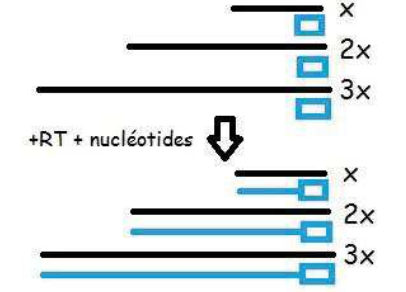
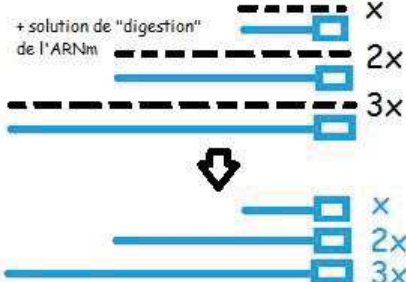
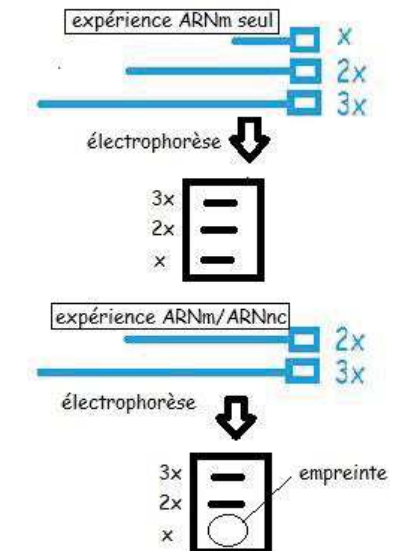
<p>1) Les modèles bio-informatiques émettent l'hypothèse qu'un ARNnc donné (en vert) doit normalement s'apparier à un endroit précis d'un ARNm donné (en noir)</p>	
<p>2) Pour vérifier ce modèle, un protocole de détection indirecte par reverse transcription est effectué, comparativement sur des grandes quantités d'un ARNm donné seul versus complexé à un ARNnc. La 1^{ère} étape consiste à adjoindre une solution contenant du plomb pour provoquer des cassures simple brin sur des sites connus. Dans l'exemple simplifié ci-contre avec un ARNm seul de longueur 3x, on obtient des fragments de 3 longueurs différentes selon l'endroit où se déroule la cassure, de 0 à 2 sites (en rouge).</p>	
<p>3) Dans le cas où un ARNnc est fixé sur un site de coupure simple brin, l'ARN est localement double brin, il « neutralise » ce site (rouge pointillé). Dans le même exemple que précédemment, après action de la solution de cassure on obtiendrait des fragments de seulement 2 longueurs possibles.</p>	
<p>4) Ces fragments d'ARNm ne peuvent être détectés tel quel. Pour ce faire, dans l'étape suivante, on adjoit des oligonucléotides d'ADN marqués au ³²P (rectangle bleu) se fixant spécifiquement à une extrémité de fragment, qui vont servir d'amorce permettant, après ajout de Reverse Transcriptase (RT) en milieu disposant de nucléotides pour la synthèse, de transcrire les compléments ADN des fragments d'ARNm considérés (rectangle + trait bleu).</p>	
<p>5) L'étape suivante consiste à ajouter une solution qui va « digérer » les brins d'ARNm (pointillé noir), ne laissant ainsi que les brins d'ADN marqués. Dans l'exemple ci-contre à partir du résultat de transcription de l'ARNm seul, on peut obtenir 3 longueurs de fragments d'ADN différents. Dans le cas de la transcription des fragments du complexe ARNm/ARNnc, il n'y aurait que 2 longueurs possible de fragment d'ADN, 2x et 3x.</p>	
<p>6) Les mélanges de brins d'ADN marqués résultant des deux expériences comparées sont ensuite séparément déposés dans un gel d'électrophorèse. Plus les brins sont petits plus ils migrent en longueur. Les brins d'une même longueur vont s'arrêter de migrer au même endroit, formant un amas. Un film autoradiographique est apposé sur chaque gel, qui va réagir avec les émissions β du ³²P des amas. Le développement de ces films permet d'obtenir des bandes, correspondant aux différents amas, représentant chacune une longueur de fragment. Dans notre exemple, il manquerait la bande correspondant à la longueur « x » sur l'électrophorèse des fragments issus du complexe ARNm/ARNnc, ce qui constitue une « empreinte ». C'est ce marqueur indirect qui est recherché pour confirmer l'hypothèse initiale.</p>	

Figure 16: Protocole schématisé de la manipulation observée dans notre étude de poste

2.3.3. ETUDE DE POSTE

Nous présenterons d'abord la paillasse principale (figure 17) puis nous détaillerons le process de manipulation (figure 18). Par souci de clarté, les différentes sous-étapes, ainsi que les photos illustratives seront rassemblées par lieu de manipulation ou par appareillage utilisé et non pas de manière chronologique. Le but n'est pas de détailler les considérations biochimiques mais bien les situations exposantes types. Les commentaires resteront orientés sur les aspects de radioprotection. Des points divers seront ensuite présentés, n'intervenant qu'indirectement dans l'observation.

Pour cette manipulation, le ^{32}P est utilisé en solution aqueuse peu volatile, avec un volume total utilisée inférieur à un millilitre (les quantités pipetées à chaque fois étant de l'ordre du μl itre). L'activité totale mise en jeu est de l'ordre de 1 MBq. Cette configuration de volume et d'activité est relativement courante en biologie moléculaire. Voici le descriptif général de la paillasse de l'agent :

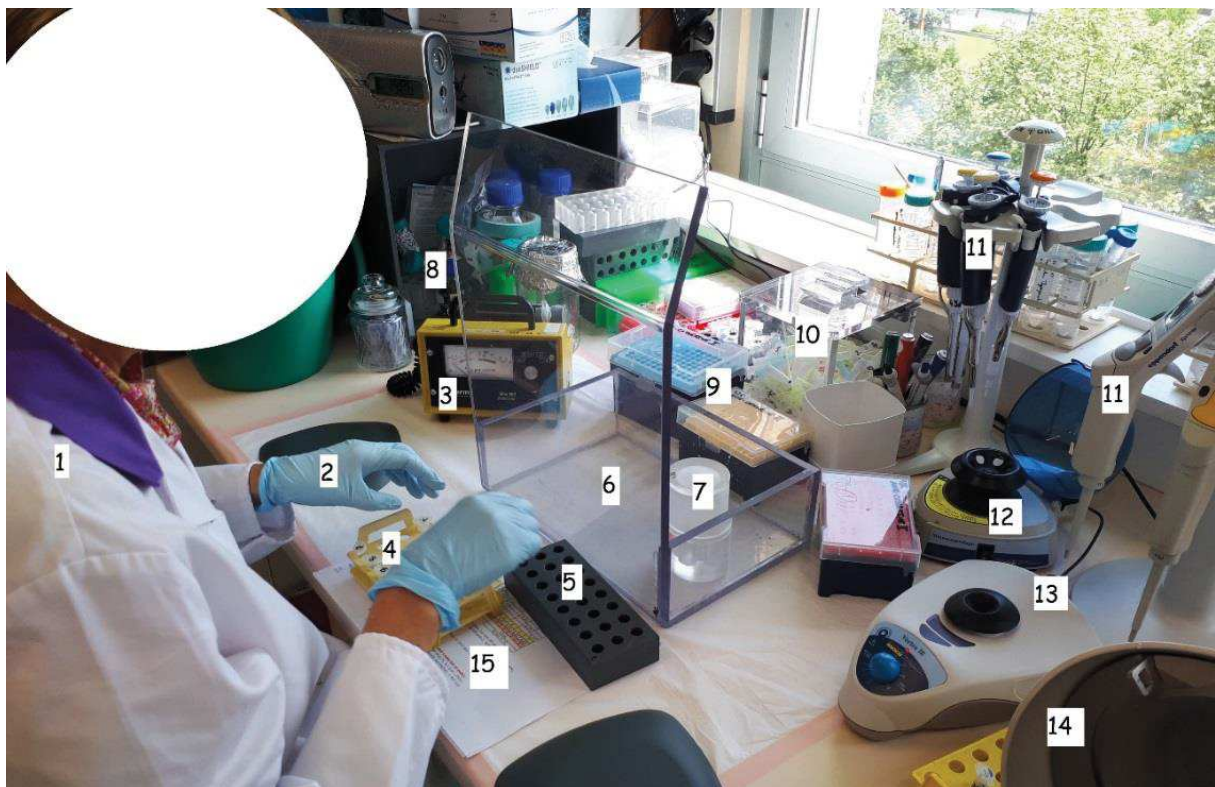


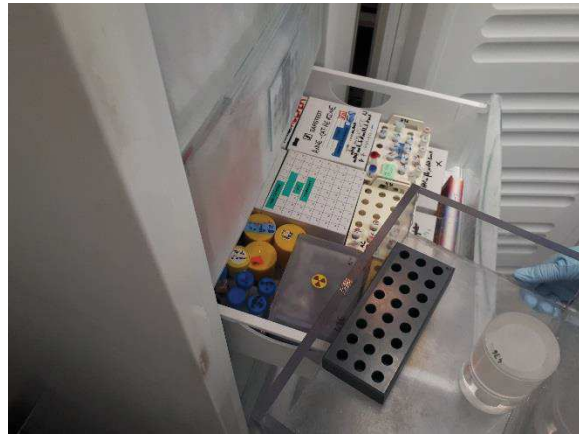
Figure 17: Vue générale du plan de travail de l'étude de poste

- 1) et 2) Les EPI portés par l'agent durant toute la manipulation sont la blouse en coton, les gants nitriles ainsi que les lunettes de laboratoire (non visibles ici du fait de l'anonymisation)
- 3) Le contaminomètre permet en temps réel de détecter une contamination de ^{32}P . Il est utilisé au minimum en début et fin de poste, suivant une checklist précise : surfaces, ustensiles, vêtements...

- 4) et 5) Les racks permettent de stocker verticalement les microtubes (aussi appelés « Eppendorf ») dans lesquels se dérouleront les réactions. Dans chaque microtube le contenu est de l'ordre de quelques microlitres. Le rack jaune 4) contient les microtubes dépourvus de radioactivité, le noir 5) est destiné à ceux contenant de la radioactivité et conçu pour en stopper le rayonnement (sauf au sommet).
- 6) L'écran plexiglas est conçu pour stopper entièrement le rayonnement du ^{32}P tout en assurant la visibilité de la manipulation en cours. Durant tout le protocole, les échantillons radioactifs sont placés derrière l'écran, seules les mains de l'agent passent également en arrière de celui-ci
- 7) Contenant blindé de la solution avec les amorces marquées au ^{32}P , pour pipetage. Tant que les 2 moitiés de ce contenant sont correctement alignées on peut l'apparenter à une source scellée. En dehors des phases de pipetage, le contenant est maintenu fermé.
- 8) Flacon blindé servant à rejeter les liquides radioactifs (non utilisé durant cette étape)
- 9) Racks de stockage des cônes (aussi appelés pointes) à usage unique servant d'embouts aux pipettes (la différence de couleurs correspond à la taille des cônes)
- 10) Poubelle plexiglas pour déchets radioactifs solides (cônes après pipetage de solution de ^{32}P ...) conçue pour stopper les rayonnements β
- 11) Portes-pipettes mécaniques (à gauche) et électroniques (à droite) avec pipettes de différents volumes pré-réglés
- 12) Centrifugeuse pour microtubes pour opérations de centrifugation rapide (en pratique utilisé seulement si nécessaire car moins capoté)
- 13) Vortex permettant, par une vibration déclenchée par l'apposition d'un microtube sur la surface noire en cupule, de « remuer » son contenu pour l'homogénéiser
- 14) Centrifugeuse pour microtubes à capotage plus hermétique. Elle n'est pas prévue en théorie pour une utilisation de microtubes à contenu radioactif (celle-ci se situe dans une autre salle) mais fréquemment utilisée malgré tout car des mesurages « empiriques » faits dans le laboratoire montrent qu'elle arrête quand même efficacement les rayonnements β .

Voici maintenant en figure 18 le descriptif de la manipulation observée :

1) En premier lieu l'agent récupère dans le congélateur du laboratoire (à environ 10m de sa paillasse) les microtubes (rack jaune) contenant les solutions intermédiaires. Ils résultent de l'étape précédente du protocole, le froid permettant une « stase » pour le stockage entre les différents moments de manipulation. L'agent récupère également le contenant de la solution d'amorces marquées au ^{32}P , stocké dans une boîte réservée aux composés radioactifs, signalisée. Contenant et boîte sont prévus pour absorber les rayons β . Tout est déposé dans l'écran de protection, orienté vers l'agent.



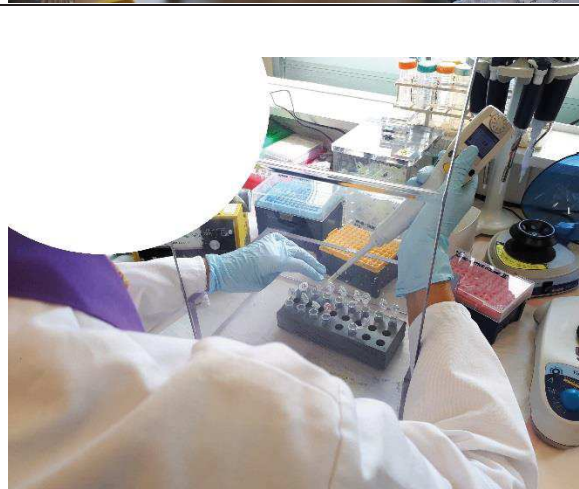
2) De retour à sa paillasse, l'opérateur transfère les microtubes de contenu encore non radioactif de leur rack vers celui prévu pour absorber les rayons β . Celui-ci sera ensuite placé derrière l'écran plexiglas de même que le contenant de la solution marquée. Jusqu'ici, le ^{32}P est scellé, l'agent n'était donc (théoriquement) ce jour-là, pas encore exposé directement aux RI.



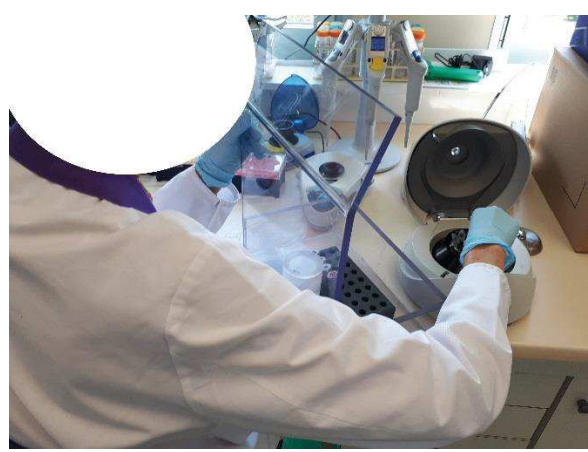
3) Les manipulations impliquant le ^{32}P débutent ensuite. L'agent ouvre le couvercle du contenant de la solution d'oligonucléotides marqués. Il récupère une pipette électronique, fixe un cône, puis aspire une quantité prédéterminée de solution marquée (de l'ordre du μL) et la dépose dans 12 microtubes dont elle ferme le couvercle. En cas de changement de pipette, le cône est jeté dans la poubelle « solide radioactif ». Le contenant de la solution marquée est ensuite refermé pour le reste de la manipulation et rangé dans le congélateur.



4) Vue de l'étape 3 sous un autre angle. Noter la main gauche de l'agent à proximité (mais pas directement au-dessus) de l'ouverture des microtubes pour les refermer un par un au plus vite une fois leur contenu en ^{32}P déposé. Le pipetage se fait cône en contact avec la paroi du microtube de sorte que le contenu pipeté s'y écoule en évitant les éclaboussures. Le cône ne rentre jamais en contact avec la solution dans le fond du microtube, pour éviter sa contamination externe. La taille des cônes et les limites de paramétrage des pipettes sont prévues pour que le niveau pipeté ne dépasse jamais les limites du cône et ne rentre donc pas en contact avec les parois de la pipette.



5) Plusieurs fois au cours de la manipulation, après adjonction du ^{32}P dans les microtubes, ceux-ci devront passer par la centrifugeuse. Pour ce faire, l'agent déplace de quelques dizaines de cm l'écran de protection, au plus près de la centrifugeuse, prends les microtubes requis sur le rack « blindé » et les y place puis ferme le capot. Elle paramètre ensuite la centrifugeuse et lance son programme. Pour poursuivre sur sa paillasse principale, l'écran est à nouveau déplacé, toujours dirigé vers l'agent et tenu autant que possible sur les côtés au niveau des bases.



6) Plusieurs fois également, il est nécessaire d'homogénéiser le contenu d'un microtube sur l'agitateur. L'agent prend le microtube concerné derrière l'écran et le place à bout de bras sur l'agitateur pour une durée courte ne dépassant pas 2 secondes, puis le replace dans le rack avant de prendre le suivant. L'induction de la vibration se fait automatiquement par détection infrarouge au contact entre le microtube et la surface vibrante du vortex (note : sur la photo le microtube n'est pas radioactif, quand c'est le cas l'agent place frontalement l'écran entre le vortex et lui)



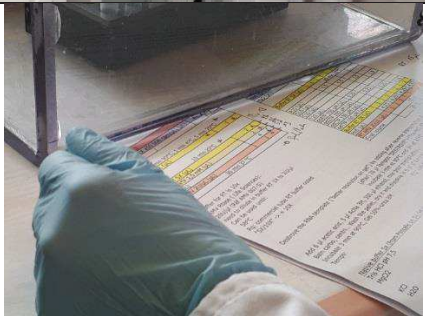





7) Une opération de chauffe puis de refroidissement des échantillons est nécessaire (elle « délie » par le chaud les ARN ayant pu prendre une mauvaise conformation pendant la congélation puis les fixe dans la bonne après refroidissement). L'écran plexiglas avec le rack sont transportés près du « temp bloc », puis les microtubes sont placés dans ses emplacements pour 1 min. Il n'y a pas de couvercle dédié, le rack (vide) est posé sur le sommet des microtubes qui dépassent pour servir de « couvercle » absorbant les rayons β . Le pot vert (contenant des glaçons) et l'écran plexiglas restent entre le temp bloc et l'agent. A la fin du chauffage, les microtubes sont placés dans le bac de glaçons, avec le bas de l'écran plexiglas comme couvercle puis ils sont remis dans le rack, la suite se déroulant sur la paillasse.



8) A la fin de la manipulation, un cycle de 30min de maintien à 37°C doit être réalisé. Un autre bloc chauffant est utilisé. Le transport du rack de microtubes a lieu comme dans l'étape 7. Ils sont disposés sur les trous centraux de la plaquette, afin de pouvoir être tous couverts par le rack qui est ensuite posé dessus (cf photo suivante)



<p>8 bis) Microtubes recouverts par le rack, pendant l'étape d'incubation à 37°.</p>	
<p>9) A la fin de la manipulation, les microtubes sont placés dans le congélateur, dans un contenant blindé signalisé comme contenant de la radioactivité. Cette étape se fait encore à l'aide de l'écran de protection, qui se situe toujours entre les échantillons et l'agent, à ceci près que la préhension de l'écran place certains doigts derrière l'écran (cf photo).</p>	
<p>Divers 1 : Pendant toute la durée de la manipulation, l'agent s'aide du protocole écrit qui détaille toutes les étapes (quantités, durées...) et sert en même temps de check list pour le suivi de son bon déroulement.</p>	
<p>Divers 2 : le laboratoire où se déroulent toutes les manipulations citées est identifié comme zone publique (donc dose efficace professionnelle théorique reçue < 80μSv/mois) et à ce titre l'accès est libre pour le personnel de l'unité (sur autorisation pour les autres).</p>	
<p>Divers 3 : l'agent chargé de la vérification hebdomadaire de la contamination des postes de travail du laboratoire est intervenu sur la paillasse de l'agent. Cette double vérification extérieure permet une sécurité supplémentaire en éliminant la « subjectivité » que peut avoir la vérification systématique de début et de fin de poste par les opérateurs eux-mêmes.</p>	
<p>Divers 4 : Vue « de la source radioactive » depuis l'autre côté de l'écran plexiglas en condition normale de manipulation. L'écran se situe entre le rack blindé et le dosimètre de poitrine de l'agent.</p>	

<p>Divers 5 : Autre salle du laboratoire, à accès règlementé, dédiée à d'autres manipulations (migration des gels d'électrophorèse...). Elle accueille les collecteurs pour déchets radioactifs liquides et solides. L'agent ne s'y est pas rendu pendant la visite de poste mais peut être amené à s'y rendre lors de manipulations similaires selon le degré de remplissage de sa poubelle à déchets radioactifs « solides » ou en cas de génération de déchets liquides.</p>	
<p>Divers 6 : Collecteur de déchets radioactifs solides. Les déchets sont déversés par une ouverture (avec un angle particulier pour éviter d'éventuels rayonnements provenant de l'intérieur). Les déchets y sont ensuite compactés.</p>	
<p>Divers 7 : Collecteur de déchets radioactifs liquides. La plaque faisant office de couvercle est simplement glissée puis les déchets sont versés dans l'entonnoir. Chaque collecteur est spécifique d'un type de radioisotope (ici collecteur ^{32}P).</p>	
<p>Divers 8 : Autre salle du laboratoire, où sont stockées les solutions de radioéléments « brutes » qui sont commandées aux fabricants. Ces solutions « mères » servent ensuite notamment à la fabrication des sondes marquées. C'est ici que l'agent vient se « servir » en radioisotopes quand il doit réaliser la synthèse des sondes marquées au ^{32}P.</p>	
<p>Divers 9 : Exemple de solution « brute » de ^{32}P. Le contenant est bien entendu opaque aux rayons β. Ces échantillons ont une durée d'utilisation limitée du fait de la demi-vie radioactive du ^{32}P. Au besoin, les volumes utilisés peuvent être ajustés selon la décroissance pour conserver la même activité globale requise.</p>	

Figure 18: Etude de poste illustrée et commentée

2.3.4. CONSTATS, IDENTIFICATION DES RISQUES

2.3.4.1. ESTIMATION DU RISQUE ACCIDENTEL

En cas d'accident perçu par un opérateur, de nombreux protocoles d'action (validés au sein du laboratoire et auxquels les agents sont formés) sont à appliquer en fonction de l'importance de celui-ci, allant d'une simple décontamination mécanique jusqu'à la fermeture du laboratoire. Une contamination occultée est plus problématique car les agents ne réagissent pas immédiatement et continuent à être exposés le temps de sa découverte (non systématique !). Des contrôles de contamination fréquents sont toutefois réalisés pour pallier ce type d'incidents.

Les données INRS (64) retrouvent, pour une source ponctuelle de 1MBq (\approx activité totale mise en jeu pendant une manipulation de biologie moléculaire), un débit de dose équivalente $h_p0.07$ en exposition directe sans protection de 1.7Sv/h (contamination cutanée), 1.4mSv/h à 10cm, 160 μ Sv/h à 30cm et 1.3 μ Sv/h à 1m. Pour un flacon en verre de 10mL rempli au tiers, ce débit chute à 0.69mSv/h (tenu en main), 2 μ Sv/h à 30cm et 0.037 μ Sv/h à 1m. La distance est un facteur déterminant primordial de l'exposition. Les résultats sont donnés en mSv par heure pour faciliter la lecture, mais rappelons qu'en pratique en laboratoire les échantillons sont rarement tenus plus de quelques secondes, et ce souvent avec des pinces pour les maintenir à distance.

Voici les estimations qui peuvent être faites sur la base de ces données en les transcrivant dans les configurations de travail de nos laboratoires :

- L'accident le plus péjoratif correspondrait au renversement d'un flacon de solution mère (blindés, hautement signalisés, avec un accès très restreint). Cela représenterait plusieurs dizaines de MBq de contamination cutanée ou surfacique. Un tel événement ne passerait probablement pas inaperçu et quand bien même, les agents sont informés de la conduite à tenir le cas échéant et elle est affichée dans les locaux.
- En pratique, toutes les autres manipulations mettent en jeu en moyenne 700kBq à 1MBq (2MBq au maximum). Cette activité est considérée sur tout un protocole : à un instant t il n'y en a qu'une infime quantité qui est manipulée. En effet, la solution à 1MBq est contenue dans un réceptacle blindé (item n°7 sur la figure 17), qui est ouvert quelques secondes pour en

prélever une partie, qui est répartie dans des 10aines de microtubes. Les estimations IRSN pour une source ponctuelle à 1MBq correspondent donc stricto sensu dans notre configuration à une contamination qui serait liée à un agent manipulant sans aucun EPC/EPI et ayant renversé tout le volume de solution radioactive de tout son protocole sans s'en rendre compte, ce qui est également improbable en routine.

- De manière plus pragmatique dans notre population d'étude, les zones de manipulation sont restreintes, il n'y a pas d'exposition à une atmosphère radioactive ; les accidents « raisonnablement prévisibles » correspondraient à la mise en jeu de volumes infimes de solution aqueuse diluée et très peu volatile. Simulons par exemple la répartition de la moitié du contenant de solution marquée d'une manipulation (0.5MBq) dans 40 microtubes. Un renversement accidentel pourrait provenir du pipetage ou de la manipulation de l'un de ces microtubes (cône de pipette défailant, microtube mal fermé...) et ne concernerait qu'une partie de son contenu (<μL). Admettons malgré tout le renversement accidentel de tout le contenu (≈1μL) de l'un d'eux sur de la peau saine qui serait repéré et nettoyé de suite : cela entraînerait une exposition au maximum de quelques 10aines de μSv.ég. Dans le cas où il serait passé inaperçu initialement, on peut imaginer qu'il ne serait détecté que lors de l'autocontrôle avec le contaminomètre en fin de poste. Si on admet un délai d'1h, l'exposition maximale serait alors de 21mSv/ég. A titre comparatif, en déterministe, la dose nécessaire à la formation d'un érythème passager est de 3 à 8 Sv. En risque stochastique, cette valeur reste faible dans l'absolu, mais non négligeable si mise en parallèle avec les aux seuils règlementaires.
- Autre simulation d'accident « réaliste » : en admettant un renversement passé inaperçu d'un microtube sur une surface proche de la zone de manipulation, le débit de dose approximatif à 30cm serait d'environ 2μSv pour une heure (durée avant que soit détecté par contrôle de surface).
- Pour toutes les valeurs de débit de dose citées, les fourchettes d'estimation sont larges on considère une exposition de peau nue (agent ne portant pas d'EPI, gouttelette passant à

travers : sous la manche de blouse...). Ces valeurs sont encore réduites si l'on intègre l'atténuation provoquée par les EPI.

- A part, il faut mentionner le risque de contamination interne en cas de contact sur peau lésée. Il est normalement inexistant dans la mesure où toutes les manipulations doivent se faire vêtue des EPI réglementaires (couvrant toute la surface corporelle à l'exception du visage) et que les lésions cutanées étendues sont une contre-indication à la manipulation (les petites plaies doivent elles être recouvertes d'un pansement étanche). Le risque encouru serait nettement majoré par rapport à une contamination externe.

Au total, l'estimation du risque accidentel « raisonnablement prévisible » lié au ^{32}P est négligeable, au vu des activités mises en jeu, de la nature du rayonnement, du faible nombre de manipulations (une 20^{aine} par an en moyenne par agent concerné), des EPC et EPI utilisés ainsi que les contrôles de contamination obligatoires de début/fin de poste. En situation de travail, le seul risque « important » proviendrait nécessairement d'une contamination cutanée passée inaperçue : le risque 0 n'existe bien entendu pas, mais les situations véritablement problématiques (projections sur plaie, passage à travers les EPI...) sont hautement improbables.

Il est important de noter que seuls les contaminomètres pourraient détecter ces incidents, les dosimètres passifs ne les détecteraient ni de manière immédiate ni (selon leur position) de manière différée (et ce n'est pas leur rôle).

Dans ces laboratoires nous n'avons pas identifié d'interactions notables entre le risque radioactif et les autres risques professionnels. En particulier, les alentours des paillasses et les zones de cheminement sont bien dégagés, rendant improbable par exemple d'hypothétiques chutes de plein pied en transportant des contenant mal fermés de solution marquée.

2.3.4.2. EXPOSITION DU TORSE

A aucun moment de la manipulation observée il n'a été retrouvé de situation où le torse de l'agent pouvait être directement exposé à un rayonnement β . Les sources sont toujours scellées ou placées derrière un écran plexiglas, le torse de l'agent (et a fortiori son dosimètre de poitrine) étant toujours

placé de l'autre côté (cf photo divers 4). En condition normale d'utilisation il est donc improbable que le dosimètre de poitrine de l'opérateur soit impacté par le rayonnement de la source manipulée. Il faut néanmoins évaluer les autres sources d'impact potentielles du dosimètre de l'agent. A ce titre deux situations « surajoutées » doivent être considérées :

1) **La coactivité** : d'après l'agent observé, il est relativement rare que deux manipulations impliquant la radioactivité aient lieu en même temps dans le laboratoire. Rappelons qu'il faut environ 3 mètres d'air pour arrêter un rayonnement β (10), les agents situés au-delà n'ayant aucun risque lié à une coactivité. On peut imaginer 3 situations théoriques où un rayonnement pourrait « s'échapper » par les côtés de l'enceinte en plexiglas :

- **1^{ère} situation (hypothétique)** : le trajet d'un rayonnement β dans l'air étant sinueux, on peut imaginer qu'une infime partie des rayonnements traversant les capuchons des microtubes, bien que dirigée initialement vers le plafond, puisse réaliser un « coude » dans l'air et se dirige en fin de parcours à l'horizontale vers les côtés. Néanmoins, lors des déplacements de l'enceinte, elle est normalement transportée le long les paillasses avec l'écran dirigé du côté opérateur. Les trajets réalisés avec l'enceinte sont par ailleurs relativement courts (3 à 4 mètres maximum entre les différents points de manipulation).

- **2^e situation** : les opérations de pipetage se faisant au fond de la caisse en plexiglas, celle-ci disposant de bords latéraux d'environ 10cm de haut, on peut estimer grossièrement que seule la moitié du volume de rayonnement émanant de la pointe du cône durant cette étape (environ 5 secondes par pipetage) « s'échappe » à l'extérieur de l'enceinte plexiglas, après toutefois avoir traversé une couche de plastique. L'autre moitié est stoppée par les parois.

- **3^e situation** : lorsque les microtubes sont tenus à la main pour être placés sur le vortex ou quand ils sont transvasés du rack blindé dans le temp bloc ou la centrifugeuse, un rayonnement diffus émane du microtube en question pendant une courte période (<5 secondes), amoindrie par le passage à travers la paroi du microtube.

Dans ces 3 rares cas, un autre agent qui se tiendrait à proximité immédiate ou se « pencherait » sur la manipulation pourrait en théorie être exposé au niveau de son torse (et d'autres parties de

son corps) ... Cette situation n'est d'une part pas rencontrée en pratique, les agents étant formés à la radioprotection (l'opérateur doit notamment prévenir ses collègues de se tenir à distance) et d'autre part représenterait une dose insignifiante, les données théoriques retrouvant dans nos configurations de travail un débit de dose maximal de quelques dizaines nSv.ég/h à 1m pour les rayonnements provenant des microtubes (sans compter l'atténuation liée aux EPI).

2) **La contamination accidentelle** : Nous l'avons vu, le risque accidentel « sanitaire » a été estimé insignifiant au-delà de quelques 10aines de centimètres de distance avec les sources mises en jeu. Or, le torse et le dosimètre de poitrine se trouvent par définition toujours à bonne distance des zones de manipulations susceptibles d'être contaminées. En cas de contamination corporelle (cutanée ou sur les vêtements), la plupart des zones à considérer sont situés à des distances supérieures à 30cm et/ou dans des angles « invisibles » pour le dosimètre de poitrine (et d'ailleurs aussi pour un dosimètre bague). La probabilité de l'impaction accidentelle d'un dosimètre de poitrine est non nulle mais apparaît improbable.

Dans toutes ces situations, d'un point de vue purement technique, rappelons qu'un rayonnement « accidentel » ne peut être détecté que s'il n'a pas été atténué pendant son trajet en dessous de 100keV. D'hypothétiques rayonnements liés à de la coexposition ou une contamination surfacique seraient nécessairement déjà nettement atténués. Quand bien même, pour ceux qui auraient toujours une énergie >100keV au moment de toucher le dosimètre de poitrine, il apparaît quasi impossible qu'une détection soit possible en hp10 du fait de cette atténuation. Seule un filtre calibré en hp0.07 pourrait les détecter.

2.3.4.3. EXPOSITION DU RESTE DU CORPS

L'étude de poste révèle que plusieurs étapes exposent potentiellement les membres supérieurs de l'agent, en particulier ses mains :

Le pipetage (Etape 3-4 figure 18) : la main droite de l'agent, qui tient la pipette, passe au-dessus (≈ 20 cm) du contenant de la solution marquée pour le prélèvement, mais pas directement à sa verticale. Ce contenant est ensuite rapidement fermé. Le poignet et l'avant-bras droits sont, durant

toute cette étape, à proximité du cône de la pipette contenant la solution radioactive. La main gauche reste en dehors de l'enceinte de plexiglas mais se place ensuite directement à proximité du cône de la pipette et de l'ouverture des microtubes pour les fermer. Au cours de cette étape, les rayonnements sont donc dirigés soit 1) vers le haut sans et avec écran (contenant de la solution, microtubes ouverts/fermés) soit 2) dans toutes les directions mais en passant d'abord à travers le cône de la pipette. Ces « écrans » n'arrêtent pas tous les rayons. Les zones les plus exposées sont les 2 mains et l'avant-bras droit. Les deux membres supérieurs sont exposés.

La manutention des microtubes (étape 5 à 9) : à chaque fois qu'un microtube de contenu radioactif doit être manipulé pour être déposé dans/sur un équipement (vortex, bains...) il est saisi par la main dominante (personne droitère en l'occurrence, cf étape 5 et 6 figure 18) du bout des doigts. Pour le saisir dans le rack blindé, la main concernée traverse initialement le flux de rayonnement vertical s'échappant à travers le couvercle du microtube. Une fois sorti du rack, le rayonnement peut théoriquement se propager dans toutes les directions jusqu'à ce qu'il soit remis dans un rack blindé (enceinte plexiglas, centrifugeuse...). Là encore, l'avant-bras « portant », et particulièrement la main, sont directement exposés au rayonnement (affaibli ici par le passage au travers du microtube). Le reste du corps est derrière l'écran plexiglas durant ces étapes.

Le transport/maintien de l'enceinte plexiglas (cf étapes 5, 7 et 9 figure 18) : en général, le transport de l'enceinte en plexiglas se fait en la saisissant sur les côtés. Les mains sont donc protégées des rayonnements, les bords latéraux permettant une surface de préhension sécurisée d'environ 10cm de haut. Il arrive qu'une ou deux mains portent/maintiennent en équilibre le dispositif au niveau de l'écran supérieur, exposant donc potentiellement quelques doigts à des RI verticaux « atténués » par les couvercles de microtubes (photo étapes 7 et 9). Les autres parties du corps ne sont pas concernés.

D'une manière générale, la main non dominante semble ici plus exposée que l'autre, les étapes exposantes la mettant en jeu (pipetage...) étant plus fréquentes que pour la dominante (vortex...) et la plaçant à une distance plus proche des sources et de manière plus directe (microtubes ouverts...). La main dominante est placée à l'extrémité du dispositif de pipetage qui en soi constitue un « écran ».

L'exposition des avant-bras ne se fait dans tous les cas pas directement sur peau nue (petite atténuation par les EPI) sauf potentiellement au niveau de l'interstice entre les gants de protection et les manches de la blouse si elles étaient trop « pendantes ». La partie distale des avant-bras peut toutefois se découvrir au fil de la manipulation, les extrémités proximales du gant et/ou distales de la blouse pouvant « s'enrouler » sur elles-mêmes par frottement.

En dehors des avant-bras, notons que les yeux restent à bonne distance de la zone de manipulation (et derrière des lunettes de protection) pendant toute la manipulation. Les membres inférieurs sont placés dans des zones inaccessibles pour les rayonnements (sous la paillasse en position assise et diamétralement opposés aux sources par rapport au fond de l'enceinte blindée en position debout). En condition normales de manipulation, L'agent n'est donc théoriquement pas concerné par le risque « cristallin » ni exposé au niveau de ses membres inférieurs.

Ce qui a été relaté dans la partie traitant des expositions indirectes (coactivité...) du torse est aussi applicable aux autres parties du corps : elle apparaît tout aussi improbable, et quand bien même serait négligeable. Concernant le risque accidentel, notons néanmoins qu'en cas de contamination surfacique, les parties du corps les plus exposées seraient probablement les mains car étant au plus près des zones les plus « contaminables » (paillasse, matériel tenu en main, enceinte plexiglas...).

Au total, les seules parties du corps à être directement exposées aux rayonnements lors des manipulations sont les membres supérieurs et en particulier les mains et avant-bras.

2.3.4.4. FOCUS SUR LES MAINS

Au vu de cette étude de poste (et dans une certaine mesure en extrapolant l'étude IRSN citée précédemment (60)), l'exposition est plus importante à la toute extrémité des doigts. A contrario, dans cette configuration, il est peu probable que les zones plus proximales du membre supérieur (poignet, avant-bras...) soient plus exposées que les doigts. Parmi les doigts, l'index est probablement l'un des plus, si ce n'est le plus, exposé. En effet, il participe à former la « pince » digitale de préhension des microtubes, avec le pouce, là où les autres doigts sont repliés et plus à distance. Il sert aussi à les refermer et passe donc dans la zone d'incidence « libre » des rayonnements dirigés vers le haut avant

que ceux-ci soient occultés par un capuchon. Cette opération est la seule où les mains sont susceptibles de traverser un flux de rayonnement non freiné autrement que par l'air ; elle dure environ 1 seconde par microtube (en pratique, les doigts sont toutefois gardés en dehors du flux). De plus, les manipulations se faisant majoritairement dans une position des mains intermédiaire entre pronation/supination, le pouce et l'index se retrouvent vers le haut. Le rayonnement émanant des contenants étant majoritairement dirigé vers le haut, il ne peut donc théoriquement toucher que ces deux doigts, les autres étant placés trop bas.

Le rayonnement incident de la pipette est dirigé dans tous les sens mais en pratique la zone la plus exposée est la main non « pipetante », en particulier les deux doigts supérieurs (pouce et index, qui dans cette position « cachent » en partie les doigts 3 à 5). Enfin, au vu des conditions de manipulation, les zones palmaires des mains sont théoriquement plus exposées que les zones dorsales. On est en droit de penser (sans ayant pu ici le prouver métrologiquement) que l'exposition des agents au niveau de leurs membres supérieurs n'est pas homogène, avec un gradient allant crescendo des zones les plus proximales vers le bout des index.

2.3.4.5. CONCLUSION

Au total, on observe une exposition théorique faible mais non nulle, concentrée aux avant-bras et concernant quasi exclusivement les mains. Le risque accidentel « raisonnablement prévisible » apparaît faible et exposerait principalement les mains. Le dosimètre de poitrine ne semble pas être un bon reflet de l'exposition de l'agent dans cette configuration de travail : les impacts non accidentels liés aux manipulations sont impossibles, et ceux liés à la coactivité ou aux accidents raisonnablement prévisibles sont négligeables. Il ne rend pas compte de ce qui se passe dans la zone la plus exposée (les mains). Cette étude de poste confirme nos intuitions quant à la non-représentativité d'une dosimétrie de poitrine et au caractère théoriquement mieux adapté ici d'une dosimétrie d'extrémités.

2.3.5. AUTRES VISITES DE POSTES

D'autres postes ont été observés à l'I1, ainsi que dans un autre institut, que nous nommerons I2. Les manipulations étaient globalement similaires et réalisées avec des équipements, volumes, activités

(...) comparables. Ces observations convergeaient avec nos conclusions, en particulier pour ce qui est de l'exposition prédominante des mains et la présence systématique d'un écran entre le dosimètre de poitrine et les sources manipulées. Quelques manipulations de ^{32}P observées à l'I2 se font sous sorbonne. De manière générale, les agents observés étaient monoexposés, ne manipulant que du ^{32}P dans des locaux dédiés. A noter quelques rares manipulations de ^{35}S pour certains agents à l'I1, sous sorbonne et dans des locaux séparés.

Dans tous les cas, à l'I1 et l'I2, la manipulation de radioactivité ne peut se faire que sur des postes de travail dédiés et signalisés. Parfois, la pièce entière contenant la paillasse « réservée radioactivité » est classée en zone « surveillée », parfois la pièce est maintenue zone publique mais une signalisation de la présence de source radioactive est faite sur ces postes de travail. A l'I1 en particulier, tous les agents amenés à manipuler du ^{32}P passent nécessairement en zone surveillée au début de leurs protocoles pour prélever ce dont ils ont besoin de la solution mère (voir photo divers 9). Cette étape constitue la manipulation mettant en jeu la plus grande activité radioactive, de l'ordre de 10 à 20 MBq, les quantités prélevées en une fois ne dépassant toutefois pas 1 à 2 MBq. Le classement en zone « surveillée » d'un certain nombre de lieux de manipulation n'apparaît pas justifié, les sources radioactives étant confinées dans une partie des pièces seulement (enceinte blindée sur une paillasse, derrière l'écran d'une sorbonne, dans une boîte à gants...). Leurs rayonnements n'exposent que les agents en manipulation. Rappelons que le classement d'une zone déclenche automatiquement un certain nombre de démarches obligatoires de radioprotection pour tous les personnels qui y circulent. Concernant les schémas des installations, les plans étaient réalisés par les services de radioprotection et consultables auprès des PCR (non diffusables).

Concernant l'évaluation du risque accidentel « raisonnablement prévisible », les conclusions étaient superposables à celles présentées en 2.3.4.1. La seule coexposition potentielle retrouvée dans les autres laboratoires (et rare en pratique) était le ^{35}S , qui est un émetteur trop faible pour être détecté par les dosimètres et avoir un impact sanitaire en situation habituelle.

2.4. HYPOTHESE

Ainsi, forts de ces conclusions bibliographiques attestant d'une relative méconnaissance de ces postes de travail ainsi que de celles de nos études de terrain qui ont légitimé notre intuition sur la mauvaise représentativité des dosimétries de poitrine (leur négativité pouvant entraîner un potentiel « faux » sentiment de sécurité) la nécessité d'une investigation plus poussée a été confortée. Une étude métrologique expérimentale apparaissait nécessaire. Nous avons donc formulé l'hypothèse d'étude suivante, pour la population des agents des laboratoires de biologie moléculaire de notre périmètre de prévention, manipulant du ^{32}P non scellé et en conditions normales de travail :

« Les dosimètres de poitrine sous-estiment l'exposition professionnelle réelle des agents, les conditions de travail rendant leur impaction improbable. L'exposition réelle est concentrée aux extrémités, à des niveaux pouvant être détectables. »

2.5. OBJECTIFS

Sur cette base, nous avons défini les objectifs suivants :

Objectif principal :

- 1) Démontrer la meilleure représentativité de la dosimétrie d'extrémité sur ces postes de travail par rapport à la dosimétrie de poitrine.

Objectifs opérationnels :

- 2) Apprécier expérimentalement les zones exposées des agents et statuer sur leur risque radiologique réel afin d'adapter leur information, catégorisation, suivi médical et dosimétrique et de le confronter aux modèles de calculs de dose prédictifs.
- 3) Constituer une étude pilote pour un retour d'expérience régional et national dans le réseau de notre organisme de recherche, afin le cas échéant de proposer un argumentaire pour une révision des pratiques (des situations de travail similaires étant courantes) et accompagner la mise en conformité avec les points concernés par la nouvelle réglementation en matière de radioprotection de 2018.

3. MATERIEL ET METHODE

3.1. CONSIDERATIONS PRELIMINAIRES

3.1.1. CAHIER DES CHARGES

Plusieurs critères semblaient devoir être remplis pour garantir la qualité et la représentativité de notre étude. Voici le « cahier des charges » qui a été approuvé par l'équipe projet et finalement retenu comme base de son protocole :

- 1) Pour des raisons pratiques et techniques une dosimétrie d'extrémité bague était à préférer à une dosimétrie d'extrémité poignet, d'une part car notre connaissance des postes de travail laissait supposer une exposition préférentielle des doigts et d'autre part car l'IRSN promeut l'utilisation privilégiée des bagues (60) ;
- 2) L'observation dosimétrique poitrine et bague devait être réalisée de manière prospective et simultanée (sans préjuger de la valeur négative attendue des dosimètres de poitrine) pour ne pas omettre une éventuelle période chargée en manipulations et/ou un accident d'exposition qui positiveraient les dosimètres poitrine. La même période d'étude devait être observée sous ces deux angles en même temps ;
- 3) La dosimétrie d'extrémités devait être réalisée simultanément sur les deux mains. Notre étude étant une première sur sa population, il convenait de ne pas préjuger de la surexposition des mains non dominantes sur celle-ci, mais au contraire de chercher à le démontrer. Cette configuration permettait de détecter une éventuelle distribution inattendue des doses entre les mains, la valeur la plus élevée des deux devant être retenue ;
- 4) Des mesurages simultanés par dosimètres témoins bague et poitrine devaient être réalisés pendant la durée de l'étude en zone radiologiquement neutre, pour estimer la radioactivité naturelle ambiante et pouvoir ensuite la soustraire aux mesurages des agents ;
- 5) La durée de l'étude devait être de plusieurs mois au minimum, pour inclure un nombre suffisamment important de manipulations observées. En effet, le volume des manipulations est très variable selon les périodes (estimé, pour les agents concernés, à une 10^{aine} par semestre). Une

durée d'étude trop courte exposait au risque de mener une campagne d'analyses dosimétriques sur des agents ne manipulant pas de source radioactive sur cette période ;

- 6) Notre étude voulant apporter des conclusions pratiques, il nous fallait nous rapprocher des conditions réelles de travail et en intégrer les contraintes dans notre protocole et nos calculs ;
- 7) Il était important de définir une répartition efficace des rôles dans l'équipe projet et notamment d'identifier des personnes « relais » pour la communication descendante (consignes envers les opérateurs observés) et ascendante (retours et questions pour l'équipe projet) ;
- 8) Les conclusions de nos recherches bibliographiques préalables devaient être prises en compte dans l'élaboration de l'étude et dans ses discussions ;
- 9) La définition claire des laboratoires et de la population cible pouvant être « recrutés » pour notre étude (critères d'inclusion/exclusion) était essentielle ;
- 10) Notre calendrier prévisionnel a été établi en vue de pouvoir présenter les premiers résultats au séminaire annuel des PCR de notre périmètre de prévention (novembre 2018, voir 6.2.6.2.) ;
- 11) Il était important de se baser sur des documents de référence pour notre stratégie (nous avons en particulier consulté le guide IRSN d'étude de poste (14) et le document de Référence Santé au Travail sur les sources non scellées en secteur recherche (66));
- 12) L'étude devait être acceptable pour les opérateurs volontaires, en leur apportant le moins de contraintes possible afin de garantir leur adhésion au protocole.

3.1.2. ASPECTS FINANCIERS ET LOGISTIQUES

Ce cahier des charges s'est heurté à différentes réalités, à l'origine de quelques concessions. Nous présentons ici les 3 principales :

Le coût : notre organisme de recherche de rattachement ne disposant pas de dosimètres bagues propres ni d'accréditation pour les analyser, il fallait nécessairement les louer. Peu de prestataires existent sur le marché. Notre choix s'est porté sur l'IRSN après avis des PCR de l'étude. Le prix, incompressible, était d'environ 15€ ttc par bague (location, lecture des résultats « bruts »...). Une

enveloppe d'environ 600€ pour les frais de dosimétrie avait été convenue pour l'étude, limitant donc celle-ci à une 20aine de personnes (2 dosimètres/agent + 1 dosimètre témoin).

Contrat prestataire : le forfait unique de l'IRSN comprend une location ne pouvant dépasser 6 mois. Prolonger l'étude au-delà de ce délai (même pour un jour) revenait à souscrire un nouveau contrat au même prix. Cet élément a été le facteur déterminant de la durée d'observation via les bagues : 6 mois.

Périodes de port : les opérateurs manipulant du ^{32}P sont déjà équipés de dosimètres poitrine trimestriels. Par exemple, un dosimètre « N » est envoyé pour lecture au moment où un nouveau dosimètre « N+1 » est mis à disposition puis porté pour les 3 prochains mois etc... Ce changement s'effectue sans parallélisme d'un agent à l'autre. Ainsi, à un instant t, un agent peut être au début de la durée de port de son dosimètre, un autre agent à 1 mois et demi... Obtenir un parallélisme rigoureux de période de port de dosimètre bague et poitrine pour chaque agent aurait été compliqué et aurait apporté des surcoûts. Dans la mesure où les résultats des dosimétries poitrine de notre population étaient toujours négatifs, il a été convenu de réaliser une seule commande de bagues pour la durée maximale de location (6 mois). Pour chaque opérateur, l'exposition « extrémités » pendant la période de 6 mois de port de dosimétrie bague serait comparée à l'exposition « corps entier » de 3 trimestres de dosimétrie poitrine successifs l'incluant. Ce protocole pour un même agent est schématisé ci-dessous, la ligne rouge correspondant à la durée de port des bagues et les lignes bleues aux trimestres successifs a, b et c de dosimétrie poitrine.

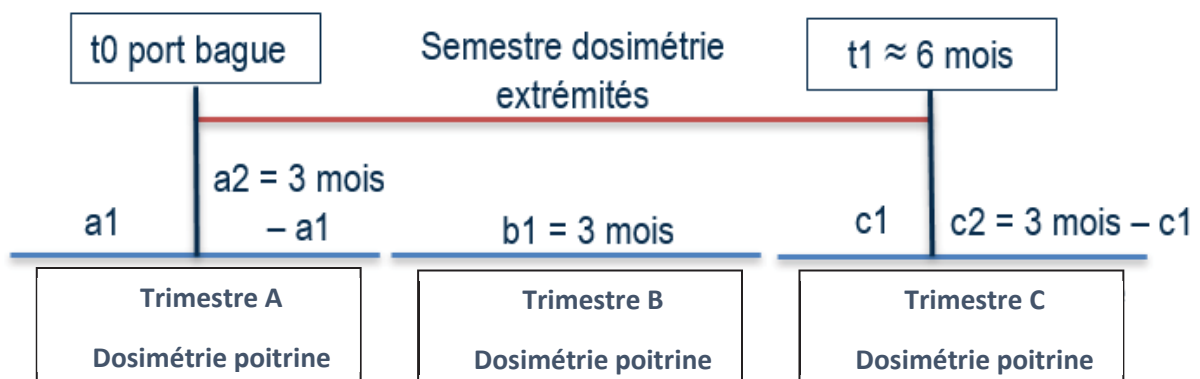


Figure 19: Périodes comparées entre dosimétrie bague et poitrine

3.2. CHOIX DU LIEU DE L'ETUDE

Les critères d'inclusion retenus pour qu'un institut soit éligible dans notre étude afin d'y recruter des agents étaient :

- 1) Institut de biologie moléculaire dont la gouvernance relève partiellement ou totalement de notre organisme de recherche, et faisant partie du périmètre géographique de l'activité de prévention des membres de l'équipe projet ;
- 2) Manipulations fréquentes de ^{32}P en solution sous forme non scellée prévisibles pendant la durée de l'étude, avec des activités de marquage moléculaire globalement semblables entre elles afin de garantir une certaine homogénéité de la population analysée ;
- 3) Recrutement prévisionnel estimé suffisant (> 15 au total sur les différents sites) ;
- 4) Acceptation et implication dans l'étude des DU, PCR et des équipes (sensibilisation au risque radiologique, adhésion au protocole, pas de réserves face aux équipements à porter...).

Dans les instituts éligibles devaient ensuite être réalisée une enquête préliminaire standardisée basée sur le guide de bonnes pratiques d'études de postes de l'IRSN (14) (voir 2.1.3.).

3.3. POPULATION, RECRUTEMENT, INFORMATION

Une fois le screening des instituts éligibles terminé, les PCR devaient réaliser le recrutement des personnels selon les critères d'inclusion et d'exclusion suivants :

- 1) Personnes volontaires, fonctionnaires ou contractuelles (post-doctorant...) quel que soit leur genre et statut hiérarchique, utilisant du ^{32}P pour des activités de biologie moléculaire de manière habituelle au poste de travail (>1x/semestre au minimum) avec manipulations prévues pendant la période de port des bagues (avril-octobre 2018) ;
- 2) Pour les personnels sous contrat à durée déterminée, celui-ci devait courir durant au moins 3 semestres de dosimétrie poitrine englobant toute la durée prévisionnelle du port de dosimétrie bague (avril-octobre 2018) ;

- 3) Le personnel devait être sédentaire pendant la durée de l'étude (exclusion des personnes susceptibles d'aller réaliser des manipulations en dehors des instituts inclus) ;
- 4) Il ne devait pas manipuler (ni être exposé indirectement à) d'autres rayonnements (β ou non) susceptibles d'interférer avec les dosimètres de l'étude (énergie > seuils de détection). Une co-exposition au ^{35}S par exemple pouvait être tolérée, son rayonnement n'étant pas visible par eux ;
- 5) L'appartenance « administrative » (dans le cas éventuel d'inclusion d'agents d'une unité mixte de recherche à gouvernance partagée) n'était pas un critère d'exclusion (la gestion habituelle des dosimétries étant de toute manière gérée par laboratoire et non pas par appartenance) ;
- 6) Ils devaient présenter des dosimétries de poitrine strictement négatives depuis au moins 2 ans (depuis leur prise de poste si ancienneté dans le laboratoire < 2 ans) ; étaient exclus ceux n'ayant pas encore eu de relevé dosimétrique (< 3 mois d'ancienneté) ;
- 7) 20 personnes au maximum réparties sur les instituts éligibles étaient pressenties, idéalement de manière homogène ;
- 8) Dans le cas où le nombre de personnes volontaires éligibles dépasserait 20 personnes, un tirage au sort devrait avoir lieu.

Chaque personne finalement incluse se voyait remettre une plaquette d'information en format flyer contenant les informations principales relatives à l'étude et aux consignes de port du dosimètre (voir version anonymisée en annexe 1). Celles-ci, conformément aux recommandations de l'IRSN, étaient les suivantes :

- 1) Chaque agent se voit assigner deux dosimètres bagues numérotés strictement personnels et latéralisés à porter aux deux index à chaque manipulation de ^{32}P ;
- 2) En dehors des périodes de manipulation, les dosimètres devaient être conservés en ambiance neutre (radioactivité ambiante = radioactivité naturelle) ;
- 3) Les dosimètres étaient à porter sous les gants de manipulation ;

- 4) La cible des dosimètres devait être orientée côté paume de main (face de la main directement exposée aux rayonnements au vu des conditions de travail et de l'étude de poste) (cf figure 20) ;
- 5) Le dosimètre de poitrine devait être porté simultanément, selon les consignes habituelles déjà en place (au niveau de la poitrine, sous la blouse, dès exposition potentielle ou passage en zone...)

Par ailleurs, une adresse mail propre à l'équipe projet a été créée afin de mettre en ligne les fichiers importants partagés et de servir de « foire aux questions » pour les opérateurs inclus.

Il était demandé à chaque agent de remplir un tableau de suivi durant toute la durée de l'étude afin de tracer les caractéristiques des manipulations réalisées et surtout de pouvoir calculer sur cette base



Figure 20: Exemple de port de dosimètre bague tel que demandé dans l'étude

l'exposition prévisionnelle selon les méthodes des PCR pour les comparer avec les valeurs mesurées. Afin d'améliorer l'observance prévisionnelle, les informations étaient limitées aux plus importantes permettant les calculs. Finalement, pour chaque manipulation de ^{32}P , il était demandé aux agents de renseigner (cf annexe 2) les items suivants (en plus du nom, main dominante et pipetante) :

- 1) Manipulation effectuée (si non formalisée : description de la tâche réalisée) ;
- 2) Protocole dont est issu la manipulation ;
- 3) Date de réalisation de la manipulation ;
- 4) Volume total mis en jeu au cours de la manipulation (volume pipeté) ;
- 5) Durée de manipulations « exposante » ;
- 6) Activité radioactive théorique manipulée ;
- 7) Champ de commentaire libre permettant de notifier toute information importante pour l'exposimétrie (accident d'exposition...).

Par ailleurs, avant le début de l'étude, chaque agent devait fournir à sa PCR les protocoles des manipulations pressenties pour les 6 prochains mois (dans l'immense majorité des cas, chaque

manipulation est codifiée dans un protocole validé). Ceci permettait de réaliser une lecture plus facile des tableaux de suivi individuels.

A la fin de la période d'observation, un questionnaire post-étude a été adressé à tous les agents participants. Il s'agissait d'un formulaire en ligne avec progression conditionnelle (selon la réponse à une question, des précisions complémentaires étaient demandées ou non). Il était conçu pour permettre de récupérer les informations nécessaires afin d'une part « d'orienter » et d'affiner la lecture des résultats et leur vraisemblance (observance du protocole de mesure, co-exposition...) et d'autre part de recueillir des éléments subjectifs (critères de contrainte du port des dosimètres...) pour moduler nos préconisations futures. Les items interrogés sont visibles en 4.5. et en annexe 5.

3.4. METHODOLOGIE DE CALCUL

Voici le détail du raisonnement que nous avons mené pour aboutir aux méthodes retenues (des méthodes de référence n'existant pas nécessairement). Nous décrirons ensuite les calculs prédictifs de dose utilisés par les PCR (utilisés pour des calculs secondaires) et les détails des tests statistiques.

3.4.1. LES RESULTATS DOSIMETRIQUES

Concernant la dosimétrie de poitrine, chaque agent dispose de son propre dosimètre RPL multi-filtre trimestriel. Un dosimètre témoin est mis en place par groupe homogène d'exposition. Les résultats étaient directement présentés sous leur forme « finale » après déduction de la radioactivité naturelle selon un calcul basé sur les consignes réglementaires (voir 1.2.3.2.). La formule était : « valeur mesurée par le dosimètre personnel de l'agent - valeur du dosimètre témoin lui étant assigné ». Deux calculs séparés étaient réalisés : un avec les données en hp10 et un avec celles en hp0.07.

Si cette différence est inférieure au seuil d'enregistrement le résultat « 0 » s'affiche dans le relevé dosimétrique de l'agent (le résultat est non significatif). Dans le cas contraire, la valeur affichée correspond à la différence arithmétique entre les deux valeurs : le résultat est considéré significatif et retenu en tant que dose d'exposition professionnelle ; le dosimètre est alors « positif ». Sur les modèles de dosimètres de poitrine utilisés, le seuil d'enregistrement était situé à 0.05mSv pour les

grandeurs hp10 et hp0.07. La réglementation impose qu'il soit $\leq 0.1\text{mSv}$ en hp10 et $< 0.5\text{mSv}$ en hp0.07, ces modèles sont plus restrictifs (situation relativement courante).

Concernant en revanche les dosimètres bague TLD, cette étape de calcul nous incombait, l'IRSN ne rendant que les résultats bruts des dosimètres « cas » et « témoin ». Après concertation avec l'équipe projet et avec des techniciens de l'IRSN, et afin de rester dans les mêmes conditions réelles de suivi dosimétrique de routine (garantes de l'applicabilité « pratique » future de nos conclusions et d'une comparabilité conservée des résultats bague/poitrine) nous avons décidé d'utiliser la même méthode de calcul pour les bagues. Les dosimètres bague de l'étude avaient un seuil d'enregistrement de 0.1mSv (pondération hp0.07). La réglementation impose pour les bagues une valeur $\leq 0.5\text{mSv}$; les modèles IRSN sont plus restrictifs. Ils étaient conçus pour détecter avec précision les rayonnements β des RN d'énergie maximale $> 0.8\text{MeV}$, ce qui correspond au ^{32}P .

3.4.2. COMPARAISON BAGUE VERSUS POITRINE

Le choix de mode de calcul a dû prendre en compte certaines difficultés liées à la nature des grandeurs mesurées. Les valeurs de dose efficace étaient à écarter de nos calculs : en plus de constituer une grandeur différente (hp10) non comparable quantitativement aux futures valeurs bagues (hp0.07), elle n'est pas une donnée utile dans notre population mono-exposée aux rayonnements β (rayons peu pénétrants non détectés en hp10, voir 1.2.4.). Il fallait donc comparer les résultats « peau » des dosimètres poitrine aux résultats « extrémités » des dosimètres bagues, tous deux en hp0.07.

Notre hypothèse supposait que la dose extrémités, contrairement aux résultats de la dosimétrie de poitrine, pouvait être non nulle (détectable). Notre objectif principal était de démontrer une meilleure représentativité de la localisation d'un détecteur au niveau des extrémités de par sa capacité à retrouver plus souvent des valeurs de dose positives, contrairement à la poitrine, et non pas d'estimer quantitativement une différence de dose, qui serait de toutes manières probablement infime et utiliserait des valeurs de dosimétrie poitrine jugées non représentatives. Une comparaison quantitative directe aurait été possible, mais non pertinente : retrouver une différence significative en

comparant quantitativement les valeurs numériques de dose extrémités et peau aurait simplement démontré (on suppose) que les valeurs bagues étaient en moyenne plus grandes. Dans une telle configuration, cette différence n'aurait peut-être même pas été retrouvée significative étant donné les faibles valeurs attendues dans chaque groupe (bonne sensibilité des dosimètres, statistiques IRSN, historique de suivi...). Significativité ou non, cela n'aurait pas préjugé de la plus grande permissivité des bagues pour trouver des résultats non nuls (dont nous postulons l'existence sur des bases radiophysiques et nos études de postes), a contrario d'un modèle se basant sur la positivité/négativité des dosimètres, rendant compte de la capacité à détecter une exposition (même faible) jusque-là invisible.

Ainsi, dans notre configuration, il était plus intéressant pour notre hypothèse et notre objectif principal de considérer la variable qualitative de positivité ou négativité dosimétrique des agents et de rechercher une différence significative entre le nombre de positifs dans chaque groupe, autrement dit comparer la capacité de chaque type de dosimètre à détecter une exposition supérieure à la radioactivité naturelle (telle que prédite par nos études de poste).

La valeur absolue qui sera retrouvée sur les bagues n'interviendra que pour les objectifs opérationnels (secondaires), en l'occurrence l'estimation du risque réel et ce si et seulement si notre hypothèse et notre objectif principal étaient validés d'abord, sans quoi cela n'aurait pas eu de sens (estimation du risque sur des données non représentatives).

Nous avons considéré comme « positif » dans le groupe « dosimètre de poitrine » tout agent présentant un résultat de dosimétrie professionnelle $>0\text{mSv}$ (en $hp0.07$) sur au moins 1 de ses 3 dosimètres trimestriels. Dans le groupe « dosimètre bague », nous avons considéré positif tout agent présentant un résultat de dosimétrie professionnelle $>0\text{mSv}$ pour au moins 1 de ses 2 bagues (rappelons que la réglementation stipule que, quand plusieurs dosimètres mesurent une même grandeur chez un même salarié, c'est la valeur la plus élevée qui est retenue).

3.4.3. CALCUL DE DOSE PREDICTIVE PAR LES PCR

Voici le calcul d'estimation de la dose théorique reçue au niveau des extrémités. Les protocoles de manipulation étant divisés en étapes, pour chacune était utilisée la formule suivante :

$$Do_x = Q_{ex} \times t_x \quad \text{avec} \quad Q_{ex} = A_x \times Qt$$

Où :

- 1) Do_x : dose reçue par un opérateur ayant effectué une étape du protocole « x » (mSv équivalent extrémités)
- 2) Q_{ex} : débit de dose aux extrémités dans les conditions de manipulation ($mSv.h^{-1}$)
- 3) t_x : durée d'exposition des extrémités à la radioactivité de l'étape « x » (h)
- 4) A_x : activité radioactive manipulée durant l'étape « x » (Bq)
- 5) Qt : débit de transfert de dose dans les conditions de manipulation ($mSv.h^{-1}.Bq^{-1}$). En clair, il s'agit du pourcentage restant du rayonnement émis par la source après atténuation due au passage à travers divers matériaux avant d'impacter la peau de l'opérateur, le tout converti en millisievert équivalent extrémités. Par souci de simplification des calculs, une valeur unique (estimée représentative du débit moyen rencontré dans les conditions de manipulation par la PCR sur la base d'abaques) a été utilisée dans tous les calculs, à savoir $1.2 \times 10^{-3} mSv.h^{-1}.Bq^{-1}$, qui correspond à peu près au débit de transfert dans le cas d'un bécher tenu au niveau du col.

Pour chaque étape du protocole, on peut donc calculer la dose théorique reçue au niveau des mains par l'opérateur. En multipliant cette valeur de dose théorique reçue par le nombre de répliques manipulés et en les additionnant, on peut donc calculer la dose totale théorique reçue par chaque agent au niveau des mains pendant la durée de l'étude. Ces calculs n'ont été réalisés que pour les protocoles de manipulation de ^{32}P et n'étaient possibles qu'en cas de tableau de suivi et/ou protocoles renseignés de manière suffisante pour être exploitable (nombreuses données nécessaires...).

3.4.4. DETAIL DES TESTS STATISTIQUES

3.4.4.1. TEST STATISTIQUE PRINCIPAL

Dans chaque groupe (bague et poitrine) a été retenu le nombre d'agent considérés « positifs » et ce sont ces deux nombres qui ont été comparés par un modèle de régression logistique (comparaison de variables qualitatives binomiales) avec effet aléatoire par sujet (chaque sujet portant les dosimètres des deux groupes) avec +/- correction de Firth (nécessaire si dans le groupe poitrine tous les dosimètres présentaient une valeur à 0mSv), le tout avec un risque α fixé à 5%. Les valeurs issues des

dosimètres des agents n'ayant finalement pas manipulé de ^{32}P durant la période d'étude étaient exclues de ce calcul.

Le critère de jugement principal retenu pour confirmer notre hypothèse (et valider notre objectif principal) était de retrouver une différence statistiquement significative à ce test en faveur de la dosimétrie bague.

3.4.4.2. TESTS STATISTIQUES SECONDAIRES

Des calculs secondaires ont été réalisés pour rechercher une significativité statistique des résultats de dosimétrie bague sur les critères suivants :

- 1) Par institut : nous avons comparé les valeurs des dosimétries bague des agents ayant manipulé entre les instituts inclus afin d'estimer grossièrement l'homogénéité de la population. Pour cela nous avons utilisé un modèle de régression linéaire (variable quantitative) en prenant un risque α de 5% ;
- 2) Par main : nous avons comparé, pour chaque agent ayant manipulé, la valeur retrouvée sur le dosimètre de la main utilisée pour le pipetage (en théorie la main dominante) versus l'autre main. Nous avons pour cela utilisé un modèle de régression linéaire avec effet aléatoire par sujet (chaque agent portant 2 dosimètres comparés l'un à l'autre) avec un risque α de 5%.
- 3) Exposition mesurée vs exposition théorique : nous avons comparé, pour chaque agent ayant manipulé et avec un tableau de suivi exploitable, la valeur de dose prédictive des extrémités (calculée par les PCR) à la plus grande des deux valeurs de dosimétrie bague effectivement mesurée. Nous avons pour cela réalisé une régression linéaire avec effet aléatoire par sujet (en considérant le lien 2 à 2 des couples de valeur pour un même agent) et un risque α de 5%.

A noter qu'au vu du faible effectif prévisible (<20 personnes) d'éventuels tests statistiques multivariés n'ont pas été envisagés, ils n'auraient pas été pertinents du point de vue de leur validité.

Au total, notre étude métrologique a donc été observationnelle, comparative, bicentrique, prospective, sur une durée totale de 9 mois.

4. RESULTATS

4.1. INSTITUTS INCLUS ET LEUR DESCRIPTIF

Sur la base de nos critères d'inclusion, 2 instituts ont été retenus. Il s'agit des mêmes instituts où nous avons réalisé les études de postes préliminaires. Les items de la checklist à recueillir avant étude de poste d'après le guide IRSN (14) (voir 3.2.) étaient donc déjà disponibles (voir 2.3. sqq). L'organisme de recherche de rattachement n'ayant pas souhaité que leurs identités soient diffusées, nous continuerons donc à les appeler institut 1 (I1) et institut 2 (I2). Le dosimètre bague témoin a été stocké à l'I1 dans la boîte dosimètre du bureau de la PCR.

4.2. DUREE, EFFECTIFS, FLOW CHART

Les dosimètres bagues ont été reçus de l'IRSN le 10/04/2018, les agents inclus dans l'étude ayant été équipés au courant de la même semaine. Afin de permettre un retour des dosimètres dans la fourchette de temps imposée par l'IRSN, il leur a été demandé de les rendre à leur PCR la semaine du 24/09/2018, l'IRSN les ayant récupérés le 11/10/2018. Au total les agents ont été équipés des dosimètres bague entre 24 et 25 semaines (environ 5,8 mois). La valeur de 6 mois sera néanmoins retenue dans la suite des résultats par souci de simplicité.

Concernant le recrutement, 10 agents ont pu être inclus à l'I1, 7 à l'I2. Pendant la durée de l'étude, 1 agent dans chaque institut n'a pas du tout manipulé de ³²P. On dénombre donc respectivement 9 et 6 agents ayant manipulé. On ne compte pas de perdu de vue dans la mesure où tous les dosimètres ont été rendus. Ces chiffres sont résumés dans le tableau ci-après.

	Institut 1	Institut 2
Nombre volontaires	10	7
Aucune manip	1	1
Perdu de vue	0	0
Total données exposés	9	6

Figure 21: Flow Chart

4.3. TABLEAUX DE SUIVI

Un tableau de suivi type (annexe 2) a été proposé aux 2 PCR de l'étude, pour qu'ils les diffusent aux agents inclus avec les consignes de remplissage. A l'I2, il s'est avéré que les 7 agents inclus présentaient en fait une activité très similaire, s'organisant autour de 4 protocoles « courts » réalisés en un seule fois. De ce fait, les tableaux de suivi pour les agents de l'I2 ont été légèrement simplifiés afin de les rendre plus aisés à renseigner.

La colonne « manipulation réalisée » et « protocole dont elle est issue » ont été fusionnées en une même colonne « protocole réalisé », qui ne pouvait donc prendre que 4 valeurs. On pouvait déduire un bon nombre d'informations (durée des phases exposantes, activités radioactives mises en jeu, volumes pipetés...) simplement par la lecture des protocoles. Ces éléments n'ont de ce ne fait pas été demandés. L'ajout d'une colonne « répliqués » (nombre d'échantillons standardisés techniques) était toutefois nécessaire afin de connaître le facteur multiplicatif à appliquer. Un exemple de tableau de suivi de l'I2 est visible en annexe 3. Bien que différent, les mêmes informations étaient au final recueillies. L'I1 a suivi le modèle de tableau standard (annexe 2).

Au terme de la période d'étude, un seul agent (issu de l'I1) n'a pas rendu son tableau de suivi. Concernant l'I2, tous les protocoles ont pu être récupérés et toutes les colonnes des tableaux de suivi ont pu être renseignées comme demandé. A l'I1, un bon nombre de tableaux nous sont revenus avec des données incomplètes. Au total, seuls les tableaux de l'I2 ont pu être exploités pour la comparaison « exposition mesurée versus exposition théorique calculée » pour les bagues.

4.4. RESULTATS DES MESURES DOSIMETRIQUES

Aucun dosimètre de poitrine n'a révélé de résultat positif. Concernant les dosimètres bagues, les résultats « bruts » (avant soustraction de la radioactivité naturelle) donnés par l'IRSN sont visibles en annexe 4. Aucun modèle de calibration spécifique du ^{32}P n'étant disponible par l'IRSN, les dosimètres ont été analysés sur un modèle de calibration Strontium considéré comme équivalent et sans perte de précision théorique. On notera principalement la valeur du dosimètre témoin à 0.27mSv et la

fourchette de valeurs des dosimètres « cas » allant de 0.25 à 0.82mSv équivalent extrémités. Cinq dosimètres affichent une valeur inférieure à celle du témoin.

La limite de détection de ces dosimètres étant à 100µSv, il existe un signal vrai sur toutes les bagues, les dosimètres étaient donc fonctionnels. Beaucoup de variables étant présentes, nous proposons de représenter les résultats « bruts » ainsi que les informations utiles à leur lecture dans la figure 22 :

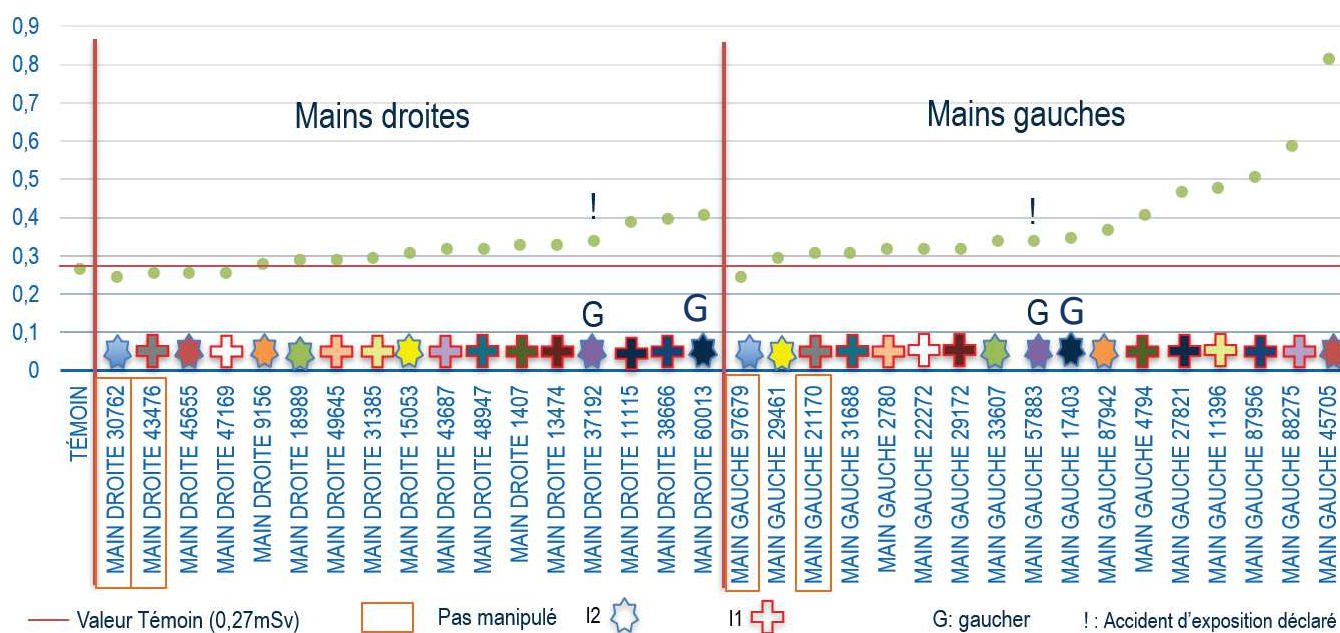


Figure 22: Graphique récapitulatif des résultats bruts des dosimètres bagues

N.B. En abscisse on trouve le numéro de chaque dosimètre bague : d’abord le témoin, puis les mains droites par ordre croissant de valeur mesurée puis une présentation identique pour les mains gauches. En ordonnée on retrouve la valeur mesurée en mSv équivalent extrémité (hp0.07). Dans chaque colonne on retrouve de haut en bas : la valeur mesurée (point vert) puis un symbole permettant d’identifier l’institut d’affectation de l’agent porteur (croix pour I1, étoile pour I2) ainsi que la bague de l’autre main (une même couleur = un même agent). Enfin est noté le numéro de dosimètre. Le trait rouge horizontal correspond à la valeur de 0.27mSv, valeur du dosimètre témoin. Les numéros des dosimètres encadrés en orange correspondent à ceux des agents n’ayant pas manipulé de ³²P pendant la période de l’étude. « G » signifie que l’opérateur concerné était gaucher (réalisation du pipetage avec la main gauche) et « ! » signifie qu’un accident d’exposition a été signalé par l’agent.

4.5. RESULTATS DU QUESTIONNAIRE POST ETUDE

Le lien du questionnaire en ligne a été fourni aux PCR pour qu'ils le fassent suivre aux agents ayant participé à l'étude, fin janvier 2019. Des relances ont été effectuées par mail. Au total, 15 agents sur 17 ont rempli ce questionnaire. L'un des non-répondants était un des agents n'ayant pas manipulé. Les questions posées et les réponses reçues sont proposées en figure 23. Elles étaient les suivantes, dans l'ordre :

N.B. les questions (Q) et réponses (R) sont écrites en caractères gras, des commentaires - n'apparaissant pas sur le questionnaire – sont proposés en italique ; la présentation et la numérotation sont ici modifiées pour rendre l'ensemble plus lisible, le détail « brut » est visible en annexe 5.

Q1 : Quel est votre nom ?

R 1 : (Anonymisé) (*champ libre, pour identification, rapportée au n° de bague et au dossier SISERI*)

Q2 : A quel institut de l'étude appartenez-vous ? (*choix fermé*)

R2 : I1 : 8 (53.3%) I2 : 7 (46.7%)

Q3 : Lors des manipulations nécessitant du pipetage, de quelle main tenez-vous la pipette ?

R3 : Droite : 13 (86.7%) Gauche : 2 (13.3%)

Q4 : Pendant la durée de l'étude (avril - octobre 2018) lorsque vous portiez les dosimètres BAGUE (et seulement à ces moments) avez-vous manipulé directement ou été exposé indirectement à d'autres radioéléments que le ³²P ?

R4 : Non : 13 (86.7%) Oui : 2 (13.3%) (*choix unique, estimation d'une éventuelle coexposition sur les dosimètres bague*)

→ (*si oui à la question 4*)

Q4bis : Si vous avez répondu "oui" à la question 4, merci de préciser au(x)quel(s) et si possible (même approximativement) le nombre de fois et de quelle manière (forme physicochimique, activité théorique, mesures de radioprotection -écrans etc...-) (champ libre, description des modalités de cette coexposition afin d'estimer grossièrement si elle joue ou non pour une part importante de la valeur finale mesurée)

R4bis 1 : « méthionine 35-S liquide - écran plexi - demi-vie : 87 jours - 1fois/semaine »

R4bis 2 : « S35, derrière un écran »

(*Après interrogatoire, les conditions de radioprotection étaient similaires aux postes de manipulation de ³²P ; le soufre 35 a par ailleurs une énergie de rayonnement trop faible pour être détecté par un dosimètre bague et donc impacter les mesures de notre étude*)

Q5 : A partir de février 2018, aux moments où vous portiez votre dosimètre DE POITRINE, avez-vous manipulé directement ou été exposé indirectement à d'autres radioéléments que le ³²P ?

R5 : Non : 14 (93.3%) Oui : 1 (6.7%)

(choix unique, recherche d'une éventuelle coexposition pour la dosimétrie de poitrine, à noter que la date de début est ici février 2018 pour inclure le début maximal théorique de port du 1^{er} dosimètre poitrine ; cette imprécision a été concédée car faire un questionnaire individuel pour demander à chaque personne la date de début de port aurait été fastidieuse... d'autant que cette imprécision est contournée à la question suivante qui demande à quelle date cette coexposition a été réalisée)

→ (si oui à la question 5)

Q5bis : Si vous avez répondu "oui" à la question 2, merci de préciser au(x)quel(s), à quelle période de l'année et si possible (même approximativement) le nombre de fois et de quelle manière (forme physicochimique, activité théorique, mesures de radioprotection -écrans etc....-)

R5bis 1 : « méthionine 35-S liquide - écran plexi - demi-vie : 87 jours - 1fois/semaine » *(après interrogatoire, conditions de radioprotection similaires aux postes de manipulation de ³²P ; l'énergie de rayonnement du 35S et aussi trop faible pour être détecté par un dosimètre de poitrine et donc n'est pas susceptible d'impacter les mesures de notre étude)*

Q6 : Portiez-vous aussi votre dosimètre de poitrine en dehors des moments où vous portiez vos dosimètres bagues? *(choix unique, estimation du parallélisme de port des 2 types de dosimètres, les dosimètres de poitrine portés en dehors des manipulations auraient pu « détecter » des rayonnement non visibles des dosimètres bagues – alors gardés en zone radiologiquement neutre- ; en pratique cette question aurait surtout eu un intérêt dans le cas où des dosimètres de poitrine avaient été positifs ou en cas de coexposition à des RI non ³²P d'énergie suffisante pour être détectée, pour estimer si cette positivité provenait du ³²P ou d'une coexposition au cours de laquelle les bagues n'étaient pas portées...)*

R6 : Oui, en permanence sur ma blouse : 8 (53.3%) Oui, souvent : 0 (0%)
Oui, rarement : 2 (13.3%) Non : 5 (33.3%)

Q7 : Portiez-vous votre dosimètre de poitrine pendant toutes les manipulations de phosphore 32? *(choix unique, estimation pour chaque agent de la représentativité de la valeur poitrine mesurée par rapport au volume de manipulation réellement effectué, pour éventuelle application de multiplicateur)*

R7 : Oui, systématiquement : 13 (86.7%) Au moins 90% du temps : 2 (13.3%)
Au moins 75% du temps : 0 (0%) Au moins 50% du temps : 0 (0%)
Moins de 90% du temps : 0 (0%)

→ Un champ libre était à disposition précisions (non reportés ici car pas importants, cf annexe 5)

Q8 : Pendant la durée de l'étude (avril - octobre 2018), il vous était demandé de porter vos deux dosimètres bagues sous votre paire de gants, sans échange de côté entre les bagues assignées « main gauche » et « main droite », cibles orientées côté paume de la main, à chaque manipulation potentiellement exposante au ³²P. Ces consignes ont-elles pu être respectées ? *(choix unique, estimation du pourcentage de bonne observance du protocole)*

R8 : Oui, à chaque manipulation : 11 (73.3%) Oui, la plupart du temps : 2 (13.3%)
Rarement : 1 (6,7%) Non concerné car pas manipulé de ³²P pendant l'étude : 1 (6,7%)

→ (si autre que « oui, tout le temps » ou « non concerné » à la question 8)

Q8bis : Si vous avez répondu "oui, la plupart du temps" ou "rarement" à la question 8, merci de préciser quelles anomalies sont concernées et à quelle fréquence approximative elles ont été rencontrées (choix multiple et champ libre, pour estimation, pour les non observants, de l'importance et des modalités de cette non observance pour juger grossièrement de la représentativité de leur valeur mesurée)

R8bis : (en résumé) Une personne souffrant d'eczéma chronique des mains n'a pas pu porter les bagues dans 50 à 75% des manipulations du fait de douleurs ; une personne pensait avoir peut-être mal orienté les cibles des dosimètres dans <10% des manipulations ; une personne disait n'avoir pas suivi strictement le protocole (sans plus de précision) 10 à 25% du temps.

Q9 : Toutes les manipulations exposant au ³²P pendant la durée de l'étude ont-elles été renseignées sur votre tableau de suivi? (choix unique, estimation de l'exhaustivité du remplissage du tableau de suivi)

R9 : Oui : 13 (86.7%) Non : 1 (6.7%) Non concerné car pas manipulé de ³²P : 1 (6.7%)

→ (si « non » à la question 9)

Q9bis : Si vous avez répondu "non" à la question 9, merci de préciser le pourcentage approximatif de manipulations renseignées sur votre tableau de suivi par rapport au nombre réel de manipulations exposant au ³²P effectuées pendant la période d'étude? (choix unique+ champ libre, précision de cette non exhaustivité)

R9bis : une personne n'ayant noté que 75 à 90% des manipulations effectuées... correspondant aux manipulations réalisées avec les dosimètres bagues (il n'a pas noté celles où il a oublié de porter les bagues)

Q10 : Comment estimez-vous subjectivement la contrainte liée au port des dosimètres bagues (temps passé pour l'enfilage/désenfilage, influence sur dextérité, sensation de serrement du doigt...) indépendamment de son bénéfice en matière de prévention (choix unique, anticipation sur la faisabilité/acceptation d'éventuelles futures propositions de changement de protocole de suivi dosimétrique par des dosimètres bagues)

R10 : Très contraignant : 3 (20%) Moyennement contraignant : 3 (20%)

Peu contraignant : 7 (46.7%) Non contraignant : 1 (6.7%)

Non concerné car pas manipulé de ³²P : 1 (6.7%)

Q11 : Si vous deviez comparer approximativement le volume de manipulations exposantes au ³²P que vous avez effectués pendant les 6 mois de l'étude par rapport au volume habituel moyen que vous effectuez ? (choix unique, estimation de la représentativité des mesures sur la période de l'étude et par déduction de ce que pourrait être l'exposition en période haute/normale/basse de volume de manipulation)

R11 : Beaucoup plus : 1 (6.7%) Un peu plus : 0 (0%) Autant : 8 (53.3%)

Un peu moins : 3 (20%) Beaucoup moins : 3 (20%)

Q12 : Y a-t-il des incidents d'exposition radiologique à signaler entre le 01/01/2018 et le jour où vous remplissez ce questionnaire? (tube contenant une solution radioactive renversé...) si oui merci de préciser ci-dessous. (choix unique + champ libre, aurait surtout eu un intérêt en cas d'accident majeur chez une personne dont la dosimétrie s'écartait nettement de la moyenne des mesures... les incidents « mineurs » n'ayant comme nous l'avons vu par calcul estimatoire qu'un impact négligeable... et seulement quand ils sont détectables)

R12 : aucun signalé sur le questionnaire

Q13 : Les dosimètres bagues ont-ils été stockés dans une zone radiologiquement neutre (radioactivité mesurée = radioactivité naturelle) en dehors des périodes de manipulation de ³²P? (choix unique, estimation de si oui ou non la partie positive des dosimétries est uniquement à mettre en rapport avec la manipulation de RN)

R13 : Oui : 15 (100%) Non : 0 (0%)

(complété par un champ libre pour décrire le lieu de stockage, non reporté ici, voir annexe 5)

→ (si « non » à la question 13)

Q13bis : Dans ce cas, pouvez-vous estimer le pourcentage du temps où les dosimètres n'ont pas été stocké en zone neutre, et quelles étaient les caractéristiques de cette zone non neutre? (zone contrôlée? proximité d'une source radioactive?...) *(champ libre, description de l'environnement radiologique auquel les bagues ont été exposées par erreur, pour estimer la part jouée dans la valeur mesurée) (non reporté ici car ne concernait aucun agent, voir annexe 5)*

Q14 : Dans cette section vous pouvez laisser tout commentaire que vous jugerez utile concernant l'étude dosimétrique. En vous remerciant cordialement pour votre participation à ce questionnaire.

R14 : 4 commentaires, non reportés ici car peu informatifs (voir annexe 5)

Figure 23: Résultats du questionnaire post étude

La confrontation des réponses à ce questionnaire avec les valeurs dosimétriques et les tableaux de suivi individuel a permis d'apporter quelques éléments complémentaires :

- L'agent ayant abandonné le port de bague pour cause d'exacerbation de problèmes dermatologiques a ses deux dosimètres négatifs (agent n°10 sur la figure 24). Il s'agit de la même personne qui n'a renseigné dans son tableau que 75 à 90% des manipulations.
- L'agent n'ayant pas strictement suivi le protocole dans 10 à 25% des cas a ses deux bagues négatives (une observance parfaite n'y aurait probablement pas changé grand-chose), celui ne l'ayant pas suivi dans 10% des cas présente deux dosimètres positifs et est la 3^e personne la plus exposée (rang ne changeant pas malgré un facteur correcteur de ces 10%) (respectivement agents n°11 et n°17 sur la figure 24).

- A la lecture des tableaux de suivi, on retrouvait des disparités importantes entre le nombre de manipulations effectuées d'un agent à l'autre. A l'I2, par ordre décroissant, 36, 20, 11, 9, 9, 4, 0 manipulations ont été renseignées dans les différents tableaux de suivi (pour 7/7 tableaux rendus déclarés à 100% exhaustifs). A l'I1, il y avait, par ordre décroissant 47, 17, 8, 6, 5, 5, 3, 3 et 0 manipulations (pour 9/10 tableaux rendus, dont 1, qui comportait 5 manipulations, n'a été déclaré exhaustif qu'à 75%, les 25 autres % correspondant aux manipulations réalisées sans porter les bagues). Au total, en faisant abstraction du tableau non rendu à l'I1, cela donne une moyenne de manipulations « vues par les dosimètres bagues » par agent, en comptant puis en ne comptant pas ceux n'ayant pas manipulé, de respectivement 12,7 et 14.8 à l'I2, 10.4 et 11.7 à l'I1, 11.4 et 13.1 pour les deux sites ensemble.
- Un incident a été déclaré sur un tableau de suivi et pas dans le questionnaire, correspondant à un contact minime de quelques secondes entre le gant de la main droite et la solution marquée, suivi d'une décontamination immédiate. Cet accident correspondait en théorie à une exposition négligeable (cf estimations d'expositions accidentelles dans la pré-étude), les dosimètres de l'agent concerné étant par ailleurs de même valeur brute et tous deux non significatifs (agent n°14 sur figure 24).
- Le port des bagues a été décrit comme une contrainte importante.
- Les mains pipetantes étaient toujours les mains dominantes et vice-versa.

4.6. SIGNIFICATIVITE DES RESULTATS DOSIMETRIQUES

4.6.1. ANALYSE DES RESULTATS DES DOSIMETRES DE POITRINE

Tous ces résultats sans exception étant revenus « non significatifs » (la valeur « 0 » s'affiche mais en réalité elle est contenue dans l'intervalle [0 ;0.05mSv]) l'analyse numérique en est relativement simplifiée. On peut affirmer sur ces données, sans besoin de recours à des tests statistiques, que la radioactivité perçue par les dosimètres de poitrine n'est pas significativement différente de la radioactivité naturelle. Toutes les valeurs étant à 0, il va sans dire que la moyenne, la médiane (...) prennent la même valeur.

4.6.2. ANALYSE DES RESULTATS DES DOSIMETRES BAGUES

Voici la compilation des résultats de ces analyses (même code couleur qu'en figure 22) :

- 1) En figure 24 sont présentés numériquement les résultats dosimétriques « bagues » des agents : valeurs brutes et valeurs corrigées après déduction du témoin (donc celles retenues comme l'exposition professionnelle). Un numéro entre 1 et 17 est assigné à chaque agent (un même numéro = une même paire de bagues). **Les mains dominantes sont mises en gras.** Les dosimètres non significatifs sont notés NS, leur valeur de différence porté-témoin est laissée à titre indicatif.
- 2) En figure 25, sont présentés les principaux descriptifs statistiques des valeurs « après déduction du témoin » de la figure 24 (colonne de droite), considérées par sous-groupes. **Les valeurs jugées les plus intéressantes sont notées en gras.**
- 3) La figure 26 représente graphiquement les données de la figure 24. La ligne noire horizontale correspondant au seuil de positivité (témoin + seuil d'enregistrement = $0.27+0.1 = 0.37\text{mSv}$). Les valeurs brutes (point vert) sur ou au-dessus de cette ligne sont considérées positives, ce qui est signifié par une étoile marron. Leur valeur est notée au-dessus (en mSv.éq). Les autres dosimètres sont considérés comme non significatifs (négatifs) et noté « ns » (valeur d'exposition retenue = 0mSv.éq , bien qu'étant en réalité située entre 0 et 0.099mSv.éq du fait du seuil d'enregistrement).

Voici en résumé, les informations importantes qu'il faut en retenir :

- 10/34 dosimètres sont positifs : 3 droits (2 mains dominantes et 1 main non dominante) et 7 gauches (mains non dominantes) ;
- Aucun des agents n'ayant pas manipulé sur la période d'étude ne présente de dosimètre positif
- 2/17 agents (tous deux à l'I1) avaient leurs deux dosimètres positifs ;
- 8/17 agents (5 à l'I1 et 2 à l'I2) avaient au moins un dosimètre positif, au minimum celui de la main non dominante (y compris pour les gauchers). Aucun agent ne présentait que son dosimètre de main dominante positif. 8 agents étaient donc « positifs » dans le groupe bague ;
- Notons qu'ici, la variable « a manipulé ou non durant la période d'étude » ne tient pas compte de la quantité de manipulations (une seule faisait passer dans le groupe « a manipulé »).

Dosimètre bague	Identité (1 numéro = 1 agent)	Valeur mesurée (mSv.éq)	Manipulé durant étude	Institut	Valeur après déduction témoin (mSv.éq) (si <0.1 : NS)
TEMOIN	n/a	0,27	n/a	n/a	n/a
MAIN GAUCHE 45705	3	0,82	Oui	I2	0,55
MAIN GAUCHE 88275	12	0,59	Oui	I1	0,32
MAIN GAUCHE 87956	17	0,51	Oui	I1	0,24
MAIN GAUCHE 11396	9	0,48	Oui	I1	0,21
MAIN GAUCHE 27821	16	0,47	Oui	I1	0,2
MAIN GAUCHE 4794	13	0,41	Oui	I1	0,14
MAIN DROITE 60013	15	0,41	Oui	I2	0,14
MAIN DROITE 38666	17	0,4	Oui	I1	0,13
MAIN DROITE 11115	16	0,39	Oui	I1	0,12
MAIN GAUCHE 87942	5	0,37	Oui	I2	0,1
MAIN GAUCHE 17403	15	0,35	Oui	I2	NS (0,08)
MAIN GAUCHE 33607	7	0,34	Oui	I2	NS (0,07)
MAIN DROITE 37192	14	0,34	Oui	I2	NS (0,07)
MAIN GAUCHE 57883	14	0,34	Oui	I2	NS (0,07)
MAIN DROITE 13474	11	0,33	Oui	I1	NS (0,06)
MAIN DROITE 1407	13	0,33	Oui	I1	NS (0,06)
MAIN GAUCHE 22272	2	0,32	Oui	I1	NS (0,05)
MAIN GAUCHE 2780	6	0,32	Oui	I1	NS (0,05)
MAIN DROITE 48947	10	0,32	Oui	I1	NS (0,05)
MAIN GAUCHE 29172	11	0,32	Oui	I1	NS (0,05)
MAIN DROITE 43687	12	0,32	Oui	I1	NS (0,05)
MAIN GAUCHE 21170	4	0,31	Non	I1	NS (0,04)
MAIN DROITE 15053	8	0,31	Oui	I2	NS (0,04)
MAIN GAUCHE 31688	10	0,31	Oui	I1	NS (0,04)
MAIN GAUCHE 29461	8	0,3	Oui	I2	NS (0,03)
MAIN DROITE 31385	9	0,3	Oui	I1	NS (0,03)
MAIN DROITE 49645	6	0,29	Oui	I1	NS (0,02)
MAIN DROITE 18989	7	0,29	Oui	I2	NS (0,02)
MAIN DROITE 9156	5	0,28	Oui	I2	NS (0,01)
MAIN DROITE 47169	2	0,26	Oui	I1	NS (-0,01)
MAIN DROITE 45655	3	0,26	Oui	I2	NS (-0,01)
MAIN DROITE 43476	4	0,26	Non	I1	NS (-0,01)
MAIN DROITE 30762	1	0,25	Non	I2	NS (-0,02)
MAIN GAUCHE 97679	1	0,25	Non	I2	NS (-0,02)

Figure 24: Résultats numériques des dosimètre bagues

Sous-groupes	Effectif (sur 34)	Moyenne (mSv.éq)	Min/Max (mSv.éq)	Médiane (mSv.éq)	Écart-type
Bagues positives seules	10	0.215	0.1/0.55	0.170	0.128
Plus grande valeur de bague pour chaque agent (agents positifs seuls)	8	0.237	0.1/0.55	0.205	0.134
Toutes bagues (valeurs non significatives incluses inchangées)	34	0.087	-0.02/0.55	0.050	0.111
Toutes bagues (valeurs non significatives comptées comme 0mSv.éq) (meilleur cas d'exposition pour un dosimètre non significatif)	34	0.063	0/0.55	0	0.120
Toutes bagues (valeurs non significatives comptées comme 0.099mSv.éq) (pire cas d'exposition pour un dosimètre non significatif)	34	0.133	0.099/0.55	0.099	0.087

Plus grande valeur de bague de chaque agent ayant manipulé (valeurs non significatives incluses inchangées)	15	0.152	0.04/0.55	0.100	0.134
Plus grande valeur de bague de chaque agent ayant manipulé (valeurs non significatives comptées comme 0mSv.éq)	15	0.127	0/0.55	0.100	0.154
Plus grande valeur de bague de chaque agent ayant manipulé (valeurs non significatives comptées comme 0.099mSv.éq)	15	0.173	0.099/0.55	0.100	0.134
Toutes bagues (agents ayant manipulé) (valeurs non significatives inchangées)	30	0.099	-0.01/0.55	0.060	0.112
Toutes bagues (agents ayant manipulé) (valeurs non significatives comptées comme 0mSv.éq)	30	0.071	0/0.55	0	0.126
Toutes bagues (agents ayant manipulé) (valeurs non significatives comptées comme 0.099mSv.éq)	30	0.137	0.099/0.55	0.099	0.092
Plus grande valeur de bague de chaque agent positif de l'I2 ayant manipulé	3	0.263	0.1/0.55	0.14	0.203
Toutes bagues des agents de l'I2 ayant manipulé (valeurs non significatives incluses inchangées)	12	0.097	-0.01/0.55	0.070	0.142
Plus grande valeur de bague de chaque agent positif de l'I1 ayant manipulé	5	0.222	0.14/0.32	0.210	0.059
Toutes bagues agents de l'I1 ayant manipulé (valeurs non significatives incluses inchangées)	18	0.101	-0.01/0.32	0.055	0.087
Bagues de mains dominantes des agents ayant manipulé (valeurs NS incluses inchangées)	15	0.048	-0.01/0.13	0.050	0.040
Bagues de mains dominantes d'agents ayant manipulé (valeurs positives uniquement)	2	0.125	0.12/0.13	0.125	0.005
Bagues de mains non dominantes d'agent ayant manipulé (valeurs NS incluses inchangées)	15	0.151	0.03/0.55	0.100	0.135
Bagues de mains non dominantes d'agents ayant manipulé (valeurs positives uniquement)	8	0.237	0.1/0.55	0.205	0.134

Figure 25: Principaux descriptifs statistiques des valeurs des dosimètres « cas » après déduction du témoin

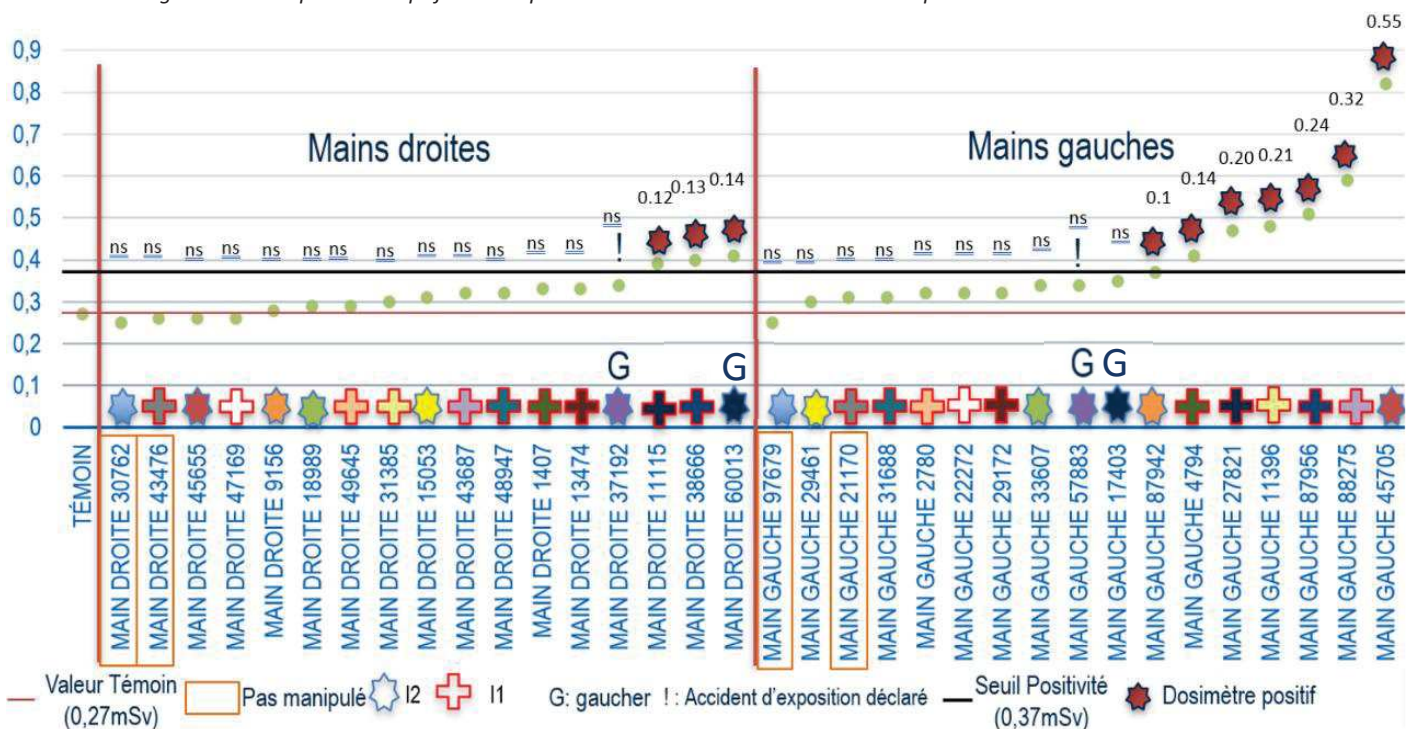


Figure 26: Représentation graphique des résultats dosimétriques avec calcul de positivité

4.7. COMPARAISON DES RESULTATS DOSIMETRIQUES

Au total, sur les 15 agents ayant manipulé, 0 étaient positifs en dosimétrie de poitrine (0 dosimètre positif sur 45) et 8 étaient positifs en dosimétrie bague (10 dosimètres positifs sur 30). En comparant le nombre d'agents positifs entre les deux modalités de dosimétrie avec un modèle de régression logistique avec effet aléatoire par sujet et correction de Firth, on trouve : $p = 0.00105858$. Le nombre d'agents ayant une dosimétrie détectant un rayonnement supérieur à la radioactivité naturelle est donc statistiquement très significativement supérieur dans le groupe bague versus le groupe poitrine.

4.8. ANALYSES SECONDAIRES

4.8.1. DIFFERENCE D'EXPOSITION ENTRE LES MAINS

Dans la figure 27 sont présentés par ordre croissant (points verts) les ratios « valeur mesurée main non pipetante (non dominante) / valeur mesurée main pipetante (dominante) » pour chaque opérateur (les valeurs considérées sont celles avant soustraction du témoin). La ligne rouge horizontale correspond à la valeur 1 (mesurage main dominante = mesurage main non dominante). La ligne bleu foncé est la droite de régression des données dans cette présentation. En ordonnées sont présentés les couples de bague pour chaque agent, la droite puis la gauche, le symbole correspondant (cf iconographie figures 22 et 26) étant représenté au-dessus de leurs identifiants.

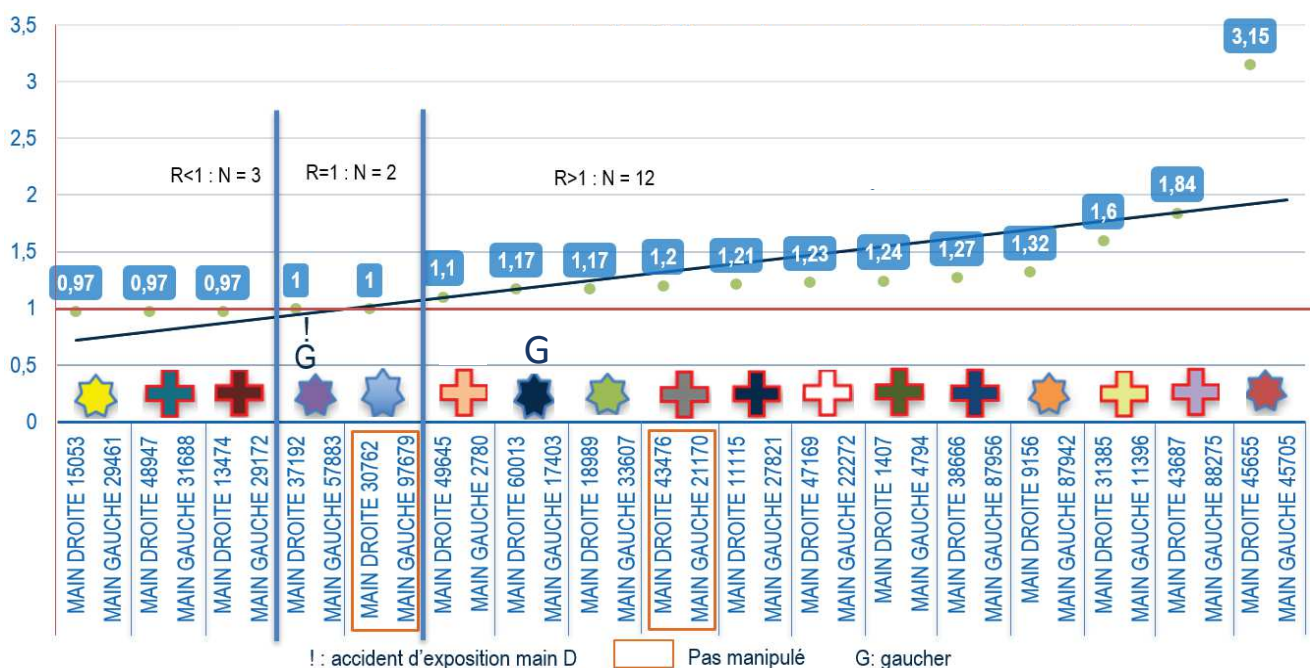


Figure 27: Valeurs inter opérateurs des ratios de leur valeur dosimétrique main non dominante/dominante

Pour 3 agents le ratio est inférieur à 1 mais globalement ils restent très proches (3 valeurs à 0.97). Deux agents ont un ratio de 1 ; 12 agents ont un ratio > 1 (étendue : [1.10 ; 3.15]). Le ratio moyen était de 1.32 (médiane 1.20). Concernant la comparaison statistique, après exclusion des valeurs d'agents n'ayant pas manipulé, on retrouve un coefficient de la relation linéaire à : -0.10267 [-0.17645638 ; -0.02887695] avec $p = 0.0111$. La différence est donc statistiquement significative. En moyenne, sur la durée de l'étude, la main dominante est exposée à 0.1mSv de moins que la main non dominante.

4.8.2. DIFFERENCE D'EXPOSITION INTER INSTITUT

Le test donne $p > 0.05$, il n'y a donc pas de différence de distribution de valeurs dosimétriques mesurées entre les instituts pour les agents ayant manipulé.

A titre indicatif, le résultat est identique si l'on réalise le même test mais en ne comparant que les valeurs des mains non dominantes ($p > 0.05$).

4.8.3. COMPARAISON VALEURS MESUREES VERSUS VALEURS THEORIQUES

Dans la figure 28, chacune des 6 colonnes (séparées par les lignes rouges verticales) correspond aux valeurs dosimétriques (après déduction de la valeur témoin) d'un même agent. Y sont présentées, de gauche à droite, les valeurs (points verts) mesurées à la main dominante (droite : D ou gauche : G), puis à la main non dominante, puis la valeur de dose reçue calculée théorique « C » (point rouge). En cas de chiffre supérieur à 2mSv de cette dose théorique, la valeur est notée manuellement et assortie d'une flèche, afin de rendre le graphique plus lisible pour des raisons d'échelle. Pour les bagues « non significatives », le chiffre « 0 » est noté. Le symbole coloré d'identification de la paire de bague (voir figure 22, 26 et 27) est représenté pour chaque agent.

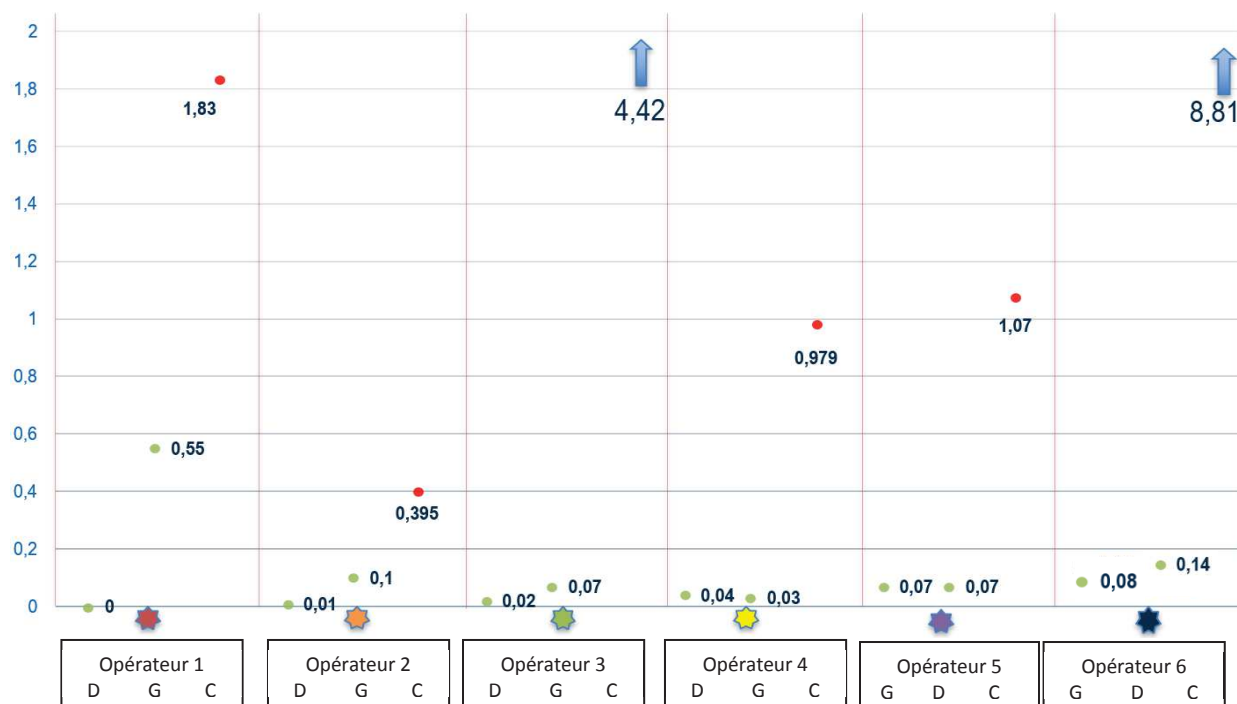


Figure 28: Valeurs d'exposition mesurée versus calculée pour les opérateurs de l'I2

En 1^{ère} lecture, on constate que pour tous les agents, les valeurs dosimétriques mesurées (D et G) sont toutes inférieures à la valeur d'exposition théorique calculée (C) qui leur est associée. Les valeurs C sont entre 3.33 fois (opérateur 1) et 63.15 fois (opérateur 3) supérieures à la plus haute des deux valeurs dosimétriques de l'agent correspondant, avec une moyenne de 28.85 (médiane de 19.88). Le test statistique retrouve un coefficient à : 2.49 [-0.07 ; 5.04] p= 0.088. Le résultat n'est donc pas significatif mais pourrait laisser apercevoir une tendance vers une évaluation excessive des valeurs calculées.

5. DISCUSSION

5.1. CONSIDERATIONS GENERALES

En 1^{ère} lecture des résultats, force est de constater que l'exposition « extrémités » mesurée chez les agents est extrêmement faible. Sur la gamme d'opérateurs observée, on retrouve des expositions totales (naturelle + professionnelle, en dose équivalente extrémités) allant de 0.50 à 1.64mSv/an, soit 0 à 1.10mSv/an d'exposition purement professionnelle. Comparé à leur gamme d'exposition « théorique » étant donné leur classification en catégorie « B » (50-150mSv.éq/an), il s'agit de valeurs négligeables (au maximum 0.74% et 2.2% respectivement de la limite d'exposition B et public).

Néanmoins, dans un souci de rigueur scientifique, il convenait de ne pas conclure sur ces seuls résultats bruts. Afin d'exclure la nécessité de classification en catégorie B au sens réglementaire, nous avons donc cherché à savoir si les agents de notre étude étaient susceptibles ou non de pouvoir dépasser ponctuellement le seuil d'exposition extrémité de 50mSv.éq. A cette fin, nous allons discuter de la vraisemblance de nos résultats dosimétriques pour en déduire d'éventuelles marges d'erreur à appliquer, et en conséquence la probabilité que ces valeurs restent <50mSv.éq/an.

5.2. COMMENTAIRES SUR LA DOSIMETRIE BAGUE

5.2.1. COMPARAISON AUX STATISTIQUES IRSN

Nos observations sont cohérentes avec les données épidémiologiques de l'IRSN concernant la dosimétrie externe passive d'extrémités dans le secteur de la recherche. Les statistiques 2017 retrouvent plus de 80% des résultats dosimétriques des personnels du secteur recherche inférieures aux limites de détection, les résultats positifs étant en majorité très proches de 0.

Pour les dosimétries d'extrémités de notre étude 8/17 agents (47%) ont une dosimétrie positive (contre 20% dans le secteur recherche) (on inclue ici ceux n'ayant pas manipulé car ils le seraient aussi dans les statistiques nationales). Notre moyenne d'exposition est cependant plus faible que celle du secteur. Cette comparaison est présentée en figure 29. Ces différences s'expliquent probablement en partie par la spécificité de leur poste de travail impliquant une manipulation de RN « pénalisants »

mais de manière très contrôlée (le ^{32}P est assez spécifique de la biologie moléculaire et peu utilisé dans d'autres secteurs), la plus longue durée de mesure (6 mois d'étude de poste contre 3 mois en suivi de routine) et la bonne sensibilité de nos dosimètres (seuil d'enregistrement à 0.1mSv), rendant une détection plus permissive mais ce qui est à détecter restant faible. Une comparaison plus approfondie avec la population nationale « ^{32}P /postes similaires » exclusive est ici impossible, ces chiffres n'étant pas disponibles sur les statistiques publiques de l'IRSN.

	Recherche	Notre étude
Corps entier		
Dose moyenne	0,21mSv/an	0mSv/an
< Seuil	90%	100%
> 1mSv	0,3%	0%
Extrémités		
Dose moyenne	2,5mSv.éq/an	0,13-0,27mSv.éq/an
< Seuil	80% des personnels	71% bagues (53% agents)

Figure 29: Dosimétries bagues de notre étude (toutes bagues, y compris non manipulé) versus moyenne du secteur recherche

5.2.2. LA NATURE DES SOURCES MANIPULEES

Le ^{32}P a beau être l'émetteur β - le plus puissant (énergie maximale 1.7MeV) manipulé dans les instituts de l'étude, il reste un émetteur « modéré » comparé à d'autres RN retrouvés en milieu professionnel (uranium 238 : 4.270MeV...). De plus, sur les postes de travail considérés, les volumes et activités mis en jeu sont très faibles (contrairement par exemple au secteur de la médecine nucléaire).

Par ailleurs, concernant la distribution des RI, il ne s'agit pas d'une contamination atmosphérique mais bien d'une source de « faible » émission, bien circonscrite dans un petit volume d'espace bien défini, le plus souvent dans un contenant prévu pour arrêter ces RI, limitant les risques d'exposition, accidentelles ou non. De plus, les questionnaires post étude ne retrouvent qu'une coexposition au ^{35}S , qui ne peut interférer avec les mesures car non détectable. Tous ces éléments sont en faveur d'une exposition maîtrisée et confortent les faibles résultats dosimétriques retrouvés.

5.2.3. LES CONDITIONS DE MANIPULATION

La plupart des contenants et tous les EPC sont conçus pour stopper les rayonnements β (les EPI dans une bien moindre mesure). Hors opérations de pipetage et utilisation de microtubes en dehors

des racks, l'opérateur n'est pas exposé. Quand c'est le cas, les rayonnements sont majoritairement dirigés vers le haut, dans une zone qui exclue le plus souvent la présence des mains, ceux-ci étant déjà amoindris par leur passage au travers de parois de contenants. En conditions expérimentales, nous avons pu globalement estimer que l'exposition des mains était très faible au-delà de 10cm de distance avec une source contenue dans un microtube et insignifiante après 30cm, le tout à condition bien sûr de passer la main dans le faisceau de rayonnement en émanant. Les mains des opérateurs ne sont que très rarement placées dans ce faisceau et à moins de 10 cm (pipetage, manipulation de microtubes...). Là encore, il s'agit d'éléments d'explication en faveur des faibles expositions retrouvées.

5.2.4. LA REPRESENTATIVITE DE CE QUI A ETE OBSERVE

Une dose mesurée aux extrémités est tributaire de l'usage qui est fait du dosimètre (exhaustivité du port, orientation de la cible...). De même, une mauvaise déclaration sur les tableaux de suivi aurait amené à une fausse estimation des doses prévisionnelles calculées. A la lumière des déclarations des questionnaires post-étude, on peut d'une part estimer que l'observance du protocole est bonne voire excellente : on retrouve schématiquement 70% d'observance parfaite, 12% quasi parfaite, 6% de mauvaise observance (pour cause médicale), 12% de non réponse. D'autre part, les items qui auraient pu biaiser les mesures ne les ont finalement pas affectés (dosimètres stockés en zone neutre, pas de coexposition détectable...). Pour toutes ces raisons, nos mesures rendent vraisemblablement bien compte du volume réel des manipulations de ^{32}P effectuées pendant les 6 mois de l'étude. Le biais lié à une mauvaise observance ou des facteurs de confusion, s'il existe, est probablement faible.

Cette observance a toutefois probablement été bonne car renforcée par l'aspect « protocole de recherche sur une durée déterminée ». Elle se serait peut-être estompée avec le temps, notamment du fait de la contrainte liée au port des bagues déclarée (et les agents se sachant désormais non exposés...). L'IRSN nous a toutefois signalé que les modèles fournis étaient de taille unique car réservés aux études de poste ; les bagues pour le suivi individuel existent en plusieurs tailles et sont de ce fait a priori plus « confortables ».

Le volume des manipulations pendant la période de l'étude était inférieur à ce qui est utilisé habituellement pour environ 35% des agents, et non renseigné pour 12%. Sur la base des éléments d'observance et des volumes manipulés, pour évaluer ce qu'auraient pu être les résultats dosimétriques des agents dans les conditions de travail les plus « défavorables » (période d'activité haute pour tous les agents et observance parfaite du port de bagues), notre équipe projet a estimé qu'un facteur 2 au maximum serait à appliquer aux résultats que nous avons mesurés. Ce facteur est probablement un peu surestimé mais permet une marge de sécurité suffisante.

5.2.5. LES MODALITES D'UTILISATION DES DOSIMETRES

D'après les conclusions de nos études de postes, nous pouvons estimer que les dosimètres bagues étaient en théorie placés sur la zone la moins exposée (1ère phalange) de la partie la plus exposée (face palmaire de l'index) du corps. Cette configuration rapproche donc probablement de ce qu'est l'exposition maximale au niveau des extrémités (et du cm² de peau le plus exposé).

Quand bien même, il faudrait appliquer au minimum un facteur d'environ 50 à la plus haute valeur retrouvée pour atteindre le seul public pour les extrémités (pour rappel, l'étude IRSN citée (60) n'estimait le ratio dose phalange distale/phalange proximale de l'index qu'à 6, et dans les conditions plus pénalisantes de la médecine nucléaire). Ces éléments permettent de raisonnablement penser que les opérateurs de notre étude disposent d'une bonne marge séparant la dose reçue à leur cm² de peau le plus exposé d'une exposition « significative », quel que soit l'emplacement des dosimètres bagues.

Il est par ailleurs illusoire de penser que des agents comme eux, effectuant des manipulations nécessitant beaucoup de dextérité, portent un dosimètre bague ou pastille sur la phalange distale de leur index. Notre mesurage sur la phalange proximale de l'index correspond probablement au meilleur compromis précision/acceptabilité pour la mise en place d'un dosimètre d'extrémité en pratique courante (c'est d'ailleurs une recommandation (60)).

5.2.6. LES CARACTERISTIQUES DES AGENTS

Notre population comprenait des opérateurs en majorité non stagiaires, formés à la manipulation de radioactivité en sécurité et bien entraînés. On peut imaginer que cette expérience dans la

réalisation des protocoles (qui par ailleurs ne varient que très peu pour un même agent) amène à un risque accidentel moindre, des temps d'exposition réduits du fait de la rapidité d'exécution, et une meilleure sensibilité vis-à-vis de la radioprotection, par rapport à un opérateur « novice ». Bien que n'étant probablement pas le déterminant majeur, cette notion est cohérente avec les faibles valeurs retrouvées. Il s'agit néanmoins d'un jugement subjectif, il est difficile d'estimer le « sérieux » dans les manipulations et le respect des consignes de radioprotection sans observations directes.

5.2.7. LES LIMITES TECHNIQUES

Les dosimètres bagues de notre étude, du fait de leur seuil d'enregistrement, ne peuvent rendre une valeur numérique positive que si la mesure est située à au moins 0.1mSv au-delà de la radioactivité naturelle. Les gammes de valeurs mesurées dans notre étude étant très faibles (<1mSv), une « petite » différence dans la limite de détection pouvait potentiellement avoir des conséquences importantes sur le nombre de bagues considérées comme positives. A titre purement indicatif, en gardant notre méthode utilisée mais avec un seuil d'enregistrement à 0.05mSv (comme les dosimètres de poitrine), cela aurait fait passer le nombre de dosimètres positifs de 10 à 21 (sur les 30 des agents ayant manipulé) et celui des agents « positifs » de 8 à 14 (sur 15 ayant manipulé). Les agents n'ayant pas manipulé seraient restés tous les deux non positifs. A l'autre extrême, avec le seuil d'enregistrement maximal autorisé par la réglementation (0.5mSv), il ne resterait qu'une bague (donc 1 agent) positive.

Par ailleurs, les bagues utilisées dans cette étude, en conformité avec la norme CEI 62387 : 2012 (67), n'étaient conçues que pour donner des mesures précises de l'exposition β en hp0.07 au-delà d'une gamme de dose de 0.8mSv.éq., ce qui est au-dessus de toutes les valeurs retrouvées (sauf une : 0.82mSv.éq). Par ailleurs, si le spectre d'énergie moyenne d'émission du ^{32}P est à son origine de l'ordre de 0.7MeV, la plupart des rayons impactant les opérateurs sont déjà atténués et pour certains peuvent avoir des valeurs très faibles à cet instant. Les bagues détectent les doses en dessous de 0.8mSv.éq et les rayons de faible énergie (sauf ceux < 100keV) mais avec une moins bonne précision. Ainsi, l'IRSN nous a indiqué que, pour être strictement rigoureux, un intervalle de confiance (IC) théorique maximal de +/- 30% pouvait être appliqué sur les résultats des bagues. Cet intervalle de confiance est une généralité théorique sur les valeurs inférieures aux seuils mentionnés, mesurées sur l'ensemble des

dosimètres des personnels suivis en dosimétrie d'extrémités... mais n'est appliqué en pratique que de manière rarissime dans les relevés dosimétriques de routine. Quand bien même, il ne changerait pas grand-chose en se plaçant en valeur absolue puisqu'on passerait au maximum de 1.1 à 1.43mSv.éq/an. Au-delà des seuils mentionnés, l'IC des mesures deviendrait probablement moins important.

Néanmoins ces limites techniques correspondent aux conditions de routine du suivi dosimétrique d'extrémités (les bagues IRSN sont d'utilisation courante). Un matériel plus précis pour la limite de détection n'est pas utilisé en pratique, cette précision sur ces gammes de valeurs infimes n'étant de toutes manières ni nécessaire d'un point de vue sanitaire ni demandé réglementairement, ni transposable pour un suivi dosimétrique standard ultérieur. Certes, avec d'autres seuils d'enregistrement en intégrant cet IC de +/-30%, le nombre de dosimètres bagues positifs aurait pu varier, ce qui aurait pu influencer sur le test statistique principal. En revanche, les conclusions « pratiques » et opérationnelles sur le non-dépassement du seuil « public » extrémités seraient restées inchangées quel que soit le nombre de bagues positives au vu des gammes de valeurs considérées. Le matériel utilisé dans notre étude était ainsi dans tous les cas suffisant pour répondre à notre objectif n°2.

5.2.8. LA BAGUE TEMOIN

5.2.8.1. LE NOMBRE DE BAGUES TEMOINS

Concernant les dosimètres de poitrine, chaque équipe (estimée groupe homogène d'exposition car manipulant dans un lieu et des conditions semblables) disposait d'un dosimètre témoin pour mesurer localement la radioactivité naturelle. Pour les dosimètres bagues en revanche un seul dosimètre témoin était disponible. Ce choix a été fait pour plusieurs raisons : leur coût, mais aussi le fait que les commandes devaient se faire en amont de la fin de période de recrutement (rappel : échéancier fixé à l'avance pour des résultats présentables au séminaire des PCR). Si le nombre d'agents qu'il serait possible d'inclure était déjà connu, nous ne savions pas encore à ce moment de combien d'équipes différentes il relèveraient (la répartition pouvant encore évoluer)... et donc combien de dosimètres témoin potentiellement commander. Dans tous les cas, pour tous les laboratoires de notre périmètre, les agents ne disposent qu'exceptionnellement de dosimètres témoins personnels. Le système d'un

témoin par équipe a ses limites : un agent peut parfois être amené à manipuler dans une autre salle, se déplacer dans l'institut, les dosimètres ne se déplaçant pas... Néanmoins, la variation locale théorique de la radioactivité naturelle entre les instituts est jugée très faible par les PCR. Ce choix constituait un authentique biais d'imprécision, susceptible d'influer sur le nombre final de bagues retenues comme positives, mais qui a été jugé acceptable par l'équipe.

En pratique, on voit néanmoins que les 4 dosimètres des agents n'ayant pas manipulé (tous ayant déclaré les avoir conservé en zone neutre) restent dans des gammes de valeurs très proches du dosimètre témoin (0.27mSv) et qu'aucun n'a retrouvé de valeur positive : 3 sont inférieurs au témoin (0.25, 0.26, 0.26mSv) et 1 est supérieur (0.31mSv). Le résultat de ce 4^e dosimètre est plus étonnant, car supérieur à certaines bagues d'agent ayant peu manipulé, alors qu'il a été conservé dans les mêmes conditions que la bague à 0.25mSv. Une partie de l'explication réside peut-être dans l'IC à considérer sur les très faibles valeurs (les bagues témoins sont soumises aux mêmes limites techniques que les bagues cas : voir 5.2.7.). Tous les résultats des bagues d'agents n'ayant pas manipulé se trouvent justement dans un intervalle de +/-30% autour de la valeur du dosimètre témoin (donc entre 0.19 et 0.35mSv), ce qui est cohérent avec l'IC donné par l'IRSN.

Quand bien même, si l'on fait la moyenne des valeurs de la bague témoin et des bagues des « non manipulateurs » on obtient 0.268mSV, soit \approx 0.27mSv, ce qui correspond justement à la valeur qui a été utilisée dans nos calculs. Il n'y aurait donc pas eu d'impact notable en cas d'usage d'une « moyenne des bagues témoin et assimilées » dans les calculs. Même si la valeur maximale à 0.31mSv avait été retenue comme valeur témoin, cela aurait encore réduit la part professionnelle de l'exposition -déjà très faible- de ces agents. Avec cette valeur, 7 bagues appartenant à 7 agents différents auraient toujours été positives, ce qui n'aurait pas changé grand-chose à la significativité de notre comparaison dosimètres bagues vs dosimètres poitrine positifs ni à nos conclusions pratiques.

Ces calculs sont proposés à titre indicatif et par transparence. De manière plus réaliste, cette incertitude de +/-30% (qui représente ici en valeur absolue +/- 80 μ Sv), serait en routine considérée comme négligeable et ne serait nullement intégrée aux calculs de dose.

5.2.8.2. DOSIMETRES « CAS » INFERIEURS AU TEMOIN

Cinq dosimètres affichent une valeur inférieure à celle du témoin (2x 0.25 et 3x 0.26mSv) dont, nous l'avons vu, 3 appartiennent à des agents n'ayant pas manipulé. Pour les 2 autres, il s'agit uniquement de dosimètres portés sur des mains utilisées pour le pipetage (à distance des sources radioactives donc). L'une des deux appartient à une personne ayant assez peu manipulé d'après son tableau de suivi. Jusque-là, ces résultats peuvent a priori ne s'expliquer que par la fluctuation locale de la radioactivité naturelle et l'IC des bagues sur les faibles mesures. Pour la dernière, plus étonnamment, il s'agit de la bague D de l'agent le plus exposé (bague G à 0.82mSv), qui a lui beaucoup manipulé. D'autres facteurs (meilleure rigueur dans les consignes de radioprotection ?) participent probablement à cette explication. Cette valeur n'est pas non plus invraisemblable, dans la mesure où, sur les 8 agents positifs, seuls 2 avaient aussi leur bague de main dominante positive.

5.2.9. METHODE DE CALCUL DE SIGNIFICATIVITE

Pour apprécier la significativité/positivité des dosimètres bagues, plusieurs méthodes de calcul plus restrictives que celle finalement retenue ont été discutées par l'équipe projet. Utiliser une méthode plus restrictive pour un type de dosimètre par rapport à l'autre aurait amené à comparer entre elles des populations de valeurs pouvant être tantôt considérées vrais positifs/négatifs tantôt faux positifs/négatifs selon la méthode utilisée, biaisant leur comparabilité en plus de constituer un niveau de précision non nécessaire. Ils n'ont donc pas été retenus.

5.2.10. LA PUISSANCE STATISTIQUE

Il y a eu plusieurs freins dans le recrutement des agents de cette étude : le budget disponible pour cette 1^{ère} approche mais aussi le fait que la population d'étude soit limitée, les biologistes moléculaires manipulant du ³²P étant une configuration typique, mais représentant peu d'agents en valeur absolue. Il aurait été difficile de recruter plus d'agents que ce que nous avons fait. Cela aurait nécessité une étude multirégionale, avec la logistique et les surcoûts que cela implique d'une part, et d'autre part avec la difficulté supplémentaire de screening et d'inclusion de laboratoires présentant une utilisation de ³²P « à peu près » homogène.

Nos conclusions portent ainsi sur 17 agents dont 15 seulement ont été exposés, avec des types de manipulation similaires mais des volumes de manipulation inhomogènes. Nos résultats statistiques ont été très significatifs, bien que l'on puisse interroger leur puissance sur un tel effectif, qui ne permettait de toute manière pas d'analyse multivariée.

En pratique courante on ne demande toutefois pas aux acteurs du suivi dosimétrique individuel d'avoir un rôle de biostatisticien. En routine les calculs utilisés ne prennent pas en compte de nombreux facteurs (imprécision technique de la mesure...), les résultats rendus aux agents ne constituent donc qu'une approximation « jugée acceptable » de leur dose effectivement reçue. Cette « simplification » au prix d'une baisse de précision relative, permet la standardisation et la reproductibilité à grande échelle et à coûts acceptables des méthodes de suivi dosimétrique. Les différences importantes dans la population suivie par une même PCR rendrait d'ailleurs difficile la constitution de groupes homogènes d'exposition à visée statistique. La PCR et le MDT gardent néanmoins un regard critique sur l'interprétation des résultats et peuvent compléter ponctuellement ces observations par des études de postes plus spécifiques.

En se plaçant du point de vue de la PCR en routine, nos observations même avant les calculs statistiques sont suffisamment parlantes : nous avons détecté pour la 1^{ère} fois une exposition professionnelle positive, jugée représentative sur la base d'études de postes poussées, qui s'avère quantitativement négligeable vis-à-vis des seuils réglementaires. Plus de 50% des agents étaient « positifs » « du 1^{er} coup » en dosimétrie bague là où aucun ne l'était en dosimétrie poitrine depuis des années. Ces seules informations suffiraient déjà aux PCR, dans les missions qui leurs sont confiées, pour statuer sur la représentativité des dosimètres et la non-justification de leur port.

Les quelques biais impactant la précision de notre étude correspondent aux mêmes biais rencontrés dans les protocoles de suivi dosimétrique habituels. Viser plus de précision n'aurait pas été pertinent ici en plus d'être plus onéreux et complexe, compte tenu de nos objectifs d'évolution reproductibles de pratiques de terrain... pour lesquels le matériel et les modalités (avec leurs limites de précision) sont de toute manière fixés réglementairement. Nos conclusions ne sauraient toutefois pas avoir la valeur ni la portée d'une étude à grande puissance statistique, la « matière » de notre sujet

ne s'y prêtant guère. Des études complémentaires et avec de plus grands effectifs seraient nécessaires afin de conclure plus largement sur la dosimétrie des biologistes moléculaires exposés au ³²P.

En somme, la confirmation de significativité statistique de notre étude, -fusse-t-elle discutable du fait du faible effectif- n'est qu'un « plus » apporté à la lecture de nos résultats. Il ne remet pas en question nos conclusions « pratiques » sur la non-exposition des agents de notre population d'étude.

5.2.11. ESTIMATION DES MARGES DE SECURITE

Voici la synthèse de notre estimation des marges de sécurité à appliquer aux résultats. Certaines de ces marges ont été estimées par nous, d'autres se réfèrent à des travaux de l'IRSN. Dans notre étude, nous proposons ainsi l'estimation maximale théorique pour l'exposition des extrémités, qui compile toutes ces marges dans une configuration d' « incertitude maximale » :

1.10 (valeur d'exposition purement professionnelle annuelle maximale mesurée aux extrémités)

x1.3 (+30%, estimation maximale de l'IRSN du fait de l'imprécision de mesure sur les petites valeurs)

x2 (facteur correcteur estimé pour configuration période de haute activité et observance parfaite)

x6 (facteur entre dose 1^{ère} et 3^e phalanges de l'index - étude de poste médecine nucléaire IRSN)

=17.16mSv équivalent extrémités/an... ce qui reste encore près de 3x inférieur à la limite publique.

Le fait que le seuil public « extrémités » ne soit pas dépassé malgré cette simulation « irréaliste » et excessive (certains facteurs de correction se recoupant d'ailleurs) est très rassurant. Une exposition accidentelle pourrait ainsi mettre en jeu une activité de 32.84mSv avant de conduire à un passage en catégorie B. Cette catégorisation nécessitant la prise en compte d'accidents « raisonnablement prévisibles » et cette estimation ayant été jugée très faible dans les conditions de manipulations des agents de notre étude (cf 2.3.6.), il paraît invraisemblable que ce seuil soit dépassé.

Au total, sur cette conclusion et au vu de toutes les raisons évoquées dans les points 5.2.1 à 5.2.9., on peut raisonnablement penser que les valeurs d'exposition insignifiantes de nos agents sont très vraisemblables. Leur risque radiologique est de fait superposable au risque de la population générale.

Les valeurs brutes retrouvées sont pour 70% négatives et au maximum à 2.2% de la limite réglementaire d'exposition du public. A titre comparatif, pour les métrologies obligatoires des agents chimiques dangereux en milieu de travail, il est admis qu'une mesure < 10% de la valeur limite d'exposition professionnelle (VLEP) est une garantie considérée comme forte que la VLEP en question n'est en réalité jamais dépassée et qu'il n'existe pas de risque pour la santé de l'opérateur (en tout cas pas au-delà des seuils acceptés).

5.3. COMMENTAIRES SUR LA DOSIMETRIE DE POITRINE

Ces dosimètres ont été pour la plupart portés plus régulièrement que les bagues (cf questionnaire post étude), ces autres moments de port relevaient probablement de l'« automatisme » de le laisser accroché à sa blouse ; ils ne correspondaient toutefois pas, toujours d'après les questionnaires, à des situations exposant à la radioactivité professionnelle. Ils sont donc assimilables à une exposition à la radioactivité naturelle seule (d'autant qu'une éventuelle exposition via coactivité a été jugée improbable). Ce port plus constant n'a donc a priori pas influé sur les résultats.

En revanche, la limite de détection est 2 fois plus fine que pour les dosimètres bague (0.05 versus 0.1mSv pour les valeurs hp0.07). Ainsi, si des rayonnements avaient dû être dirigés vers la poitrine des agents, surtout dans les gammes d'exposition <1mSv rencontrées ici, ils auraient eu bien plus de chance d'être détectés comme significatifs à cet endroit. Le fait que, sur 61 dosimètres de poitrine, a priori correctement portés, aucun ne soit revenu positif malgré ces conditions de détection plus sensibles, est un argument fort pour estimer que sur ces postes de travail, l'exposition professionnelle au niveau du torse est insignifiante (et non représentative de l'exposition réelle). Ces résultats sont cohérents avec la moyenne nationale en secteur recherche, où >80% des dosimètres de poitrine sont négatifs.

5.4. COMPARAISON DES DOSIMETRIES

5.4.1. PARALLELISME DES PERIODES DE PORT

Pour avoir une période d'observation rigoureusement parallèle entre les dosimètres bagues et poitrine dans notre étude, étant donné les modalités de port (poitrine) et du contrat fournisseur

(bagues) il aurait fallu, après recrutement, commander une à une les bagues en fonction du calendrier individuel de chaque agent, pour que le port des bagues débute au même moment que celui du dosimètre poitrine. Cette procédure générerait son lot de complexité technique (commandes répétées, frais de port supplémentaires, risque de perdus de vues devant les durées d'attente...) et méthodologique (durée de l'étude pouvant être décalée jusqu'à 3 mois au-delà de l'échéance ciblée du séminaire des PCR, décalage des périodes d'observation et de port/analyse des bagues d'un opérateur à l'autre limitant la comparaison interindividuelle...). Une autre alternative pour « superposer » les durées de port de dosimètres aurait été de faire porter un 2^e dosimètre de poitrine à chaque agent à t=0 et t=3mois de la période de port des dosimètres bagues. Cela aurait engendré un surcoût et rendu l'observance plus contraignante. Ainsi, ces alternatives n'ont pas été retenues.

La méthode de comparaison que nous avons choisie, bien que non superposée, était bien plus simple et permettait de s'affranchir des biais suscités, au prix d'un biais de « non-parallélisme » jugé minime eu égard à l'historique des résultats négatifs des dosimétries de poitrine, une base de comparaison de trois trimestres de dosimétrie de poitrine négative donnant les mêmes résultats qu'avec deux. Le fait que nous ayons retrouvé un nombre d'agents positifs en dosimétrie bague statistiquement supérieure à celui en dosimétrie poitrine malgré cette inégalité en renforce la vraisemblance.

5.4.2. MODE DE CALCUL

Le choix du mode de comparaison qualitatif par nombre d'agents ayant un dosimètre positif, indépendamment de sa valeur, était pour nous le meilleur compromis permettant d'explorer une représentativité malgré la nature différente de ce qui était mesuré, tout en permettant de répondre à nos hypothèses et objectifs au vu de la configuration de travail. Ce modèle comportait le « risque » de ne pas retrouver de différence significative en cas de positivité (même faible) de certains dosimètres de poitrine. Nous faisons le « pari » a priori que les dosimètres de poitrine de notre étude resteraient négatifs. Ce pari était rendu néanmoins peu risqué au vu de l'historique des relevés, de nos études de poste et des statistiques IRSN de la branche recherche. Le fait que, malgré ces conditions, une différence significative persiste est là aussi un autre argument pour sa vraisemblance.

Ce modèle ne prend pas en compte l'importance des résultats positifs des bagues, et ne permet pas d'apporter d'explication à certains de leurs déterminants (expérience des agents, dextérité...). Certaines caractéristiques ont toutefois pu être précisées au moyen du tableau de suivi et du questionnaire post étude (volume de manipulation, observance...). Quand bien même, ces inconnues dans la méthode (consenties dès le départ de l'étude) n'étaient pas susceptibles de modifier nos conclusions, l'architecture de notre étude permettant par ailleurs de recueillir suffisamment d'autres éléments de leur discussion (tableau de suivi, questionnaire poste étude...). Des modèles plus complexes n'auraient probablement pas apporté de gain significatif sur les conclusions pratiques.

Par ailleurs, dans notre méthode, à partir d'une seule manipulation déclarée, les agents étaient considérés comme « manipulant » (et donc leurs données étaient intégrées aux calculs). Cohabitaient donc dans notre population des agents ayant beaucoup et ayant peu manipulé. Il aurait d'ailleurs été difficile d'en faire autrement, les plannings et volumes de manipulation étant très variables en recherche en intra et inter opérateur. Chiffre intéressant : malgré l'inclusion d'agents ayant peu manipulé, nous retrouvons dès cette 1^{ère} enquête plus de 50% de positivité en dosimétrie bague (y compris chez des « petits » manipulateurs), là où la dosimétrie poitrine n'en retrouvait aucune depuis des années, malgré une même pondération hp0.07. La représentativité des bagues en est renforcée. Nos conclusions pratiques (notamment l'estimation du risque de dépassement du seuil « public » extrémités) s'étant basées sur les valeurs des agents les plus exposés (et ayant beaucoup manipulé), il va sans dire qu'elles s'appliquent d'autant plus à ceux ne réalisant que peu de manipulations.

5.5. TABLEAUX DE SUIVI ET QUESTIONNAIRE POST ETUDE

5.5.1. TABLEAUX DE SUIVI

La principale déconvenue de notre étude a été le nombre de tableaux de suivi inexploitable. Pour certains, la colonne « activité manipulée » semble avoir été interprétée comme « nature de la radioactivité manipulée » (« phosphore 32 » inscrit au lieu de la valeur mise en jeu en MBq...), d'autres ne renseignaient pas de manière homogène sur les durées de manipulation (...). Les calculs de dose prédictive requérant beaucoup de données, seul un tableau de suivi exhaustif permettait de les

effectuer. Avec le recul, il est probable que l'information descendante vers les agents et les consignes de remplissage n'étaient pas assez claires de notre part. Des visites sur place pendant l'étude pour identifier les difficultés et rappeler les consignes auraient probablement été judicieuses, de même qu'un recours plus fréquent à la « simplification » de tableaux basée sur les protocoles préétablis. Fort heureusement, le critère de jugement principal de notre étude était pensé pour rester indépendant de ces données (il était prévisible que tous les tableaux ne seraient pas remplis), cela n'a donc pas impacté nos conclusions. Les tableaux de suivi n'intervenaient que dans certains calculs et éléments de discussion secondaires.

5.5.2. QUESTIONNAIRES POST-ETUDE

Le questionnaire post étude a été envoyé « un peu tard » (toute fin janvier 2019) par rapport à la fin de la durée de port des dosimètres bagues (fin septembre 2018), exposant à des biais liés à l'oubli de certaines informations. Cette date de janvier 2019 a été choisie pour permettre de couvrir en un seul questionnaire l'ensemble de la période du port des bagues mais aussi celle des dosimètres de poitrine (qui pouvait justement en théorie courir jusqu'à janvier 2019). Nous avons préféré ce format là pour rendre la chose plus acceptable pour les agents. Multiplier les questionnaires (un en octobre 2018 pour les bagues, un à distance pour le reste...) aurait probablement augmenté le nombre de non-réponses.

Ce questionnaire ne nécessitait pas de grande précision dans les réponses, les intervalles des pourcentages étant larges et beaucoup de questions étant binaires (oui/non...). L'objectif était d'orienter grossièrement la vraisemblance et la représentativité des résultats. La date tardive d'envoi a pu avoir un impact mais il était probablement minime dans ces conditions.

5.5.3. COMPILATION DES DEUX

L'observation conjointe rapide des tableaux et questionnaires ne retrouve pas de nette corrélation entre observance déclarée, volumes de manipulations et valeurs dosimétriques mesurées. Sans pouvoir le préciser plus, cela peut s'expliquer par le fait que de nombreux autres facteurs influent sur un résultat dosimétrique (dextérité/l'expérience des agents, géométrie des flux de RI...).

5.6. ANALYSES SECONDAIRES

5.6.1. COMPARAISON SELON LA MAIN

Dans cette comparaison un certain nombre de biais disparaissent. En effet, pour chaque couple de bagues, certaines dissemblances entre opérateurs sont gommées (lieu de stockage des bagues, dextérité...), les questionnaires post-étude en retrouvant une utilisation et un stockage simultané et selon des modalités identiques. De même, la part de la dose mesurée liée à la radioactivité naturelle pouvait ainsi être jugée quasi identique pour chaque paire de bagues (aux incertitudes de mesure près), ce rayonnement étant considéré isotrope et homogène en un même endroit.

Dans notre étude, pour calculer statistiquement une différence d'exposition purement professionnelle entre les bagues selon la main, il fallait soit comparer deux à deux les valeurs après déduction du témoin -unique- (sachant que la radioactivité naturelle peut fluctuer légèrement d'un endroit à l'autre) soit comparer les données mesurées « brutes » ayant deux à deux une part liée à la radioactivité naturelle jugée identique. Ainsi, nous avons choisi la 2^e option afin de conserver (et pouvoir profiter de) ce meilleur parallélisme de comparabilité dans chaque paire de bagues. Ce « 0.1mSv » de plus correspond donc à une exposition purement professionnelle.

Cette différence « absolue » de 0.1mSv.éq dans notre échantillon est faible, mais représente en valeur « relative » une augmentation d'environ 200%. Dans notre population, ces résultats sont à relativiser quant à leur intérêt « clinique », les valeurs mesurées sur les mains non dominantes, bien qu'en moyenne 3x plus élevées que celles des mains dominantes, restent négligeables vis-à-vis des limites d'exposition réglementaires. Néanmoins, si ces facteurs étaient extrapolables à d'autres secteurs plus exposants (médecine nucléaire...) ces résultats ne seraient pas à négliger.

La différence de volume des manipulations entre opérateurs a pu impacter les résultats : quand bien même une main non dominante aurait été plus exposée que l'autre, si cette différence d'exposition était trop petite (ne se démarquant pas assez du fait d'un nombre de manipulations trop restreint) elle risquait de passer inaperçu du point de vue du calcul statistique, d'autant que la gamme de valeurs était très petite. Une différence significative a néanmoins été retrouvée, à prendre avec du

recul du fait du faible effectif et des valeurs de l'IC proches de la non-significativité : [-0.176 ; -0.029].

Les biais suscités sont probablement la principale explication des valeurs « limites » de cet IC.

Au-delà des valeurs statistiques, cette différence est cohérente compte tenu de la connaissance des postes de travail ainsi que des données générales des études de postes similaires (60).

5.6.2. COMPARAISON PAR INSTITUT

Les deux instituts présentaient une utilisation du ³²P et d'EPC/EPI globalement comparable (données PCR pour le screening pré-inclusion). Ils se sont également révélés proches en termes de volumes moyens de manipulations par agent (données des tableaux de suivi). L'absence de différence significative d'exposition des agents entre eux semble donc cohérente. Ce résultat va dans le sens d'une population d'étude homogène, bien que ces seuls éléments ne permettent pas de l'affirmer.

5.6.3. COMPARAISON AUX VALEURS THEORIQUES

Seuls les agents de l'I2 ont rendu des tableaux de suivi exploitables. Ils ont déclaré les avoir remplis de manière exhaustive et avoir eu une observance parfaite des consignes de port des dosimètres bagues. Ainsi les calculs de comparaison « dose mesurée versus dose prévisionnelle » qui ont été réalisés sont a priori basés sur le volume réel des manipulations effectuées et des activités détectées par les dosimètres bagues. Malgré cela, nous n'avons pas pu conclure statistiquement sur la différence entre les valeurs mesurées et prévisionnelles des bagues, probablement majoritairement du fait du petit effectif des 6 tableaux exploitables. Au-delà de ce résultat lié à la trop faible puissance statistique, notons que l'ampleur des différences retrouvées est très importante (entre 3 et 63 fois plus grand) et le p est proche de la significativité (0.088), ce qui peut orienter sa lecture. Il est probable que la différence aurait été significative si les 15 tableaux avaient été exploités, mais on ne peut pas l'affirmer.

Pour ces 6 agents, le volume de manipulations (estimé par leur tableau de suivi) n'est pas proportionnel à l'importance de leur valeur dosimétrique mesurée, contrairement à leur valeur théorique (ce calcul se basant précisément sur le volume des manipulations). Cela confirme là encore que de nombreux facteurs autres que le seul volume des manipulations entrent en jeu pour expliquer la valeur dosimétrique mesurée.

D'un point de vue plus général il est raisonnable de penser que les chiffres prévisionnels calculés par la PCR étaient surestimés. De nombreuses approximations étaient concédées à des fins de simplification des calculs. Les durées d'exposition théoriques pour un protocole donné sont standardisées dans les calculs indépendamment de la réalité (on suppose que le protocole est réalisé de manière uniforme entre opérateurs, ce qui ne prend pas en compte leur état de fatigue, de concentration, de rapidité, d'expérience...). Le débit de dose est considéré comme constant pour un modèle de bêcheur maintenu au col, alors que les mains peuvent en pratique se trouver plus loin... ou, rarement, plus près des sources radioactives.

Malgré ces imprécisions, il s'agissait là de la seule alternative qui était à disposition des PCR pour évaluer l'exposition « extrémités » des agents avant notre étude, qui a justement permis de mettre à l'épreuve ce modèle théorique. Avant notre analyse, ces modèles pouvaient prédire des expositions théoriques des extrémités non négligeables. Au maximum, parmi les 6 tableaux exploitables on retrouvait ≈ 16 mSv.éq/an, représentant plus de 30% de la limite d'exposition « public » (avant application de marges de sécurité). Sur un tel résultat, bien qu'inférieur au seuil d'exposition public, on ne pouvait pas affirmer que la limite des 50mSv.éq n'était jamais dépassée, et de fait une classification en catégorie « B » aurait été justifiée. A contrario, notre étude expérimentale plus précise et ciblée a retrouvé empiriquement une exposition négligeable (0.14mSv/éq/6mois soit 0.28mSv.éq/an) pour ce même agent. Elle a permis de trancher avec nettement plus de certitude et de sécurité la question du bien-fondé de la « déclassification » des agents, renforçant le sentiment de sécurité au poste de travail, tant d'un point de vue réglementaire que vis-à-vis du risque stochastique (même si à priori le risque 0 n'existe pas). Cela a été l'un des principaux avantages de notre étude.

Nous nous sommes posé la question de l'intérêt d'affiner le modèle de calcul prévisionnel des PCR sur la base de nos résultats (prise en compte d'autres facteurs, variation du coefficient de débit de dose selon l'étape...). Cela aurait été très contraignant et aurait nécessité des études de poste individualisées très poussées. Les résultats dosimétriques très faibles retrouvés dans notre analyse permettaient largement de surseoir à cette alternative, qui a donc été abandonnée.

5.7. VALIDATION OU NON DE L'HYPOTHESE ET DES OBJECTIFS

Au total, pour les différentes raisons évoquées dans le chapitre 5, sur la base de la confirmation statistique comparative et prospective de notre critère de jugement principal et de la comparaison aux valeurs théoriques calculées, mais aussi et surtout sur des arguments factuels (études de poste, 1^{er} relevé de dosimétries positives, recueil de données de discussion permettant d'estimer les marges de sécurité et la vraisemblance des résultats...) nous pouvons estimer notre hypothèse vérifiée, de même que nos objectifs 1 et 2. La dosimétrie bague est bien ici plus pertinente que la dosimétrie de poitrine, mais sa mise en place en tant que suivi dosimétrique ne serait pas utile, une classification B de notre population n'étant pas justifiée.

Notre étude constitue la 1^{ère} campagne empirique de mesures ayant permis de statuer sur le risque radiologique réel des agents de notre population, et constitue une base argumentaire solide pour faire évoluer les pratiques sur celle-ci. Du fait de l'architecture de notre étude proche des conditions de terrain, notre mode opératoire serait facilement transposable sur d'autres postes de travail similaires, dans nos laboratoires et en dehors, dans une configuration de suivi dosimétrique. En cela, elle peut constituer un socle pour des études futures, qui seront nécessaires afin de pouvoir transposer nos conclusions en dehors de notre population d'étude. Sur bon nombre de postes extérieurs à notre population d'étude, de nombreux points communs avec notre population s'observent en tout cas déjà (relative uniformité d'usage du ³²P en biologie moléculaire, mêmes historiques de dosimétries négatives...), ce qui apparaît évocateur de cette transposabilité. Notre 3^e objectif semble rempli.

Nos préconisations d'optimisation des pratiques ainsi que les remontées d'information que nous avons mises en place seront précisées au chapitre 6.

5.8. DIVERS

Cette étude est un bel exemple de collaboration inter-services pour une meilleure prévention et sécurité au travail, réunissant des acteurs de disciplines variées mais ayant la radioprotection en dénominateur commun. Concernant le Médecin du Travail, cette étude s'est inscrite dans un certain nombre de ses missions, en particulier :

- La coordination d'une équipe pluridisciplinaire de santé et prévention au travail ;
- L'évaluation des conditions de travail et risques professionnels en tant que conseiller de l'employeur, dans l'optique d'une optimisation de la prévention (dosimétrique et médicale) ;
- La réalisation d'actions en milieu de travail (visite de poste, promotion des bonnes pratiques...) ;
- La recherche et l'épidémiologie ;
- La communication et valorisation des résultats auprès des instances décisionnelles concernées.

L'une des forces de notre étude a été son originalité. Bien entendu, il ne s'agit pas de la 1^{ère} métrologie d'extrémités (chaque année plus de 1600 personnes en bénéficient dans le secteur de la recherche, dont un certain nombre de biologistes moléculaires ...). Néanmoins, ces 1600 métrologies ne sont pas des études de postes. Elles font partie d'un processus standardisé visant à satisfaire à une obligation légale en comparant des données brutes à des seuils, et ne sont ni accompagnées de tests comparatifs statistiques, ni de questionnaires de recherche d'éléments explicatifs des résultats, ni d'évaluation des facteurs correcteurs à appliquer (...). Notre étude se voulait relever d'une authentique démarche de recherche avec pour volonté d'apporter des éléments de réflexion détaillés pour une évolution des pratiques de terrain. De telles études approfondies ciblant ces postes de travail ne sont pas nombreuses dans la littérature ; celles retrouvées (pour d'autres radionucléides) n'évaluent d'ailleurs qu'un type de dosimétrie (et non pas une comparaison) et sur des périodes de suivi relativement courtes.

Nos résultats ne remettent aucunement en question les pratiques actuelles de radioprotection. Au contraire, ils confirment leur intérêt et leur efficacité, le nombre de points d'amélioration identifiés étant donc minime... si bien qu'un allègement -réfléchi- du suivi dosimétrique devrait être discuté.

Au total, cette étude a été l'occasion de rappeler qu'il faut garder un œil critique et scientifique sur les chiffres bruts d'un contrôle dosimétrique (comme dans toute métrologie !), et ne pas se contenter de leur seule valeur. Une dosimétrie quelle qu'elle soit n'est jamais rien d'autre qu'un reflet de ce qui est détecté par un dosimètre, cette valeur étant sensible à de nombreuses variables. Elle ne correspond pas stricto sensu à la réalité de la dose effectivement reçue par l'opérateur et peut au

mieux s'en approcher, mais la valeur réelle exacte (dans notre étude : l'intégration de l'exposition des extrémités, ou même par extension la valeur sur le cm² de peau le plus exposé) est toujours inconnue.

Si notre étude n'apporte peut-être pas de résultats surprenant du point de vue de la radiophysique théorique, elle aura eu le mérite de constituer une preuve expérimentale concrète validant des intuitions portées par des préventeurs depuis un certain temps. Des points d'amélioration des pratiques et conditions de travail peuvent parfois être « juste sous nos yeux », et c'est bien le rôle des préventeurs, en particulier du médecin du travail, de savoir les identifier et les exploiter avec un regard averti, là où pour d'autres ils resteraient inaperçus.

6. MISE A PROFIT DES RESULTATS

6.1. DEMARCHE DE REFLEXION DE L'EQUIPE PROJET

A ce stade, dans le cadre de la démarche standard de prévention et d'amélioration des conditions de travail, nous avons donc réalisé la phase d'évaluation du risque. La phase suivante est la planification des actions en conséquence. Notre équipe projet s'est donc réunie après réception et exploitation des résultats pour définir ces axes. Voici explicités certains points de notre raisonnement.

Dans notre population d'étude, du point de vue des conditions de manipulations et de la radioprotection, celles observées sont tout à fait satisfaisantes. La marge d'amélioration est quasi nulle. De fait, des aménagements techniques de protection supplémentaires ne seraient ni utiles, ni prioritaires, d'autant qu'ils pourraient apporter des contraintes supplémentaires (manutention, contraintes physiques...). Quelques suggestions mineures ont néanmoins été faites (voir 6.2.2.1.).

Devant cet état de fait, le mieux étant l'ennemi du bien, nous avons pointé le fait que les agents considérés sont sur certains aspects « surprotégés ». Dans la configuration actuelle, nous avons cherché à dissocier le socle des « bonnes pratiques », qu'il convient absolument de pérenniser, de celles superflues (génératrices de coûts et contraintes inutiles), sans bien entendu faire de concession sur la santé et la sécurité des agents.

Nous avons formulé deux types de propositions afin d'optimiser les pratiques : celles couvrant l'organisation générale de la radioprotection dans les laboratoires de notre périmètre de prévention et celles axées sur les postes de travail de notre étude. Pour ces dernières, bien que nos données ne permettent de conclure que sur leur analyse, nos propositions se sont voulues « larges » pour pouvoir être facilement transposées à d'autres postes de travail similaires, dans d'autres laboratoires de recherche, sans nous limiter à la biologie moléculaire. Ces propositions ont été basées sur notre étude, mais aussi sur celles disponibles dans la littérature « transposables » dans nos configurations de travail, ainsi que sur l'expertise technique des membres de l'équipe projet.

Comme nous l'avons vu, l'ASN estime que plus de 40% des personnels disposant d'un suivi dosimétrique en recherche sont surclassés (estimation confortée par nos observations). Ces chiffres parlent d'eux-mêmes ; un authentique changement de paradigme dans la manière de concevoir le suivi de radioprotection est nécessaire afin d'être profitable au plus grand nombre. Afin de mener à bien cet objectif transversal, nous avons inclus dans nos communications un dialogue avec les décideurs concernés (DU, directeur général, CRHSCT...) mais également questionné l'organisation hiérarchique et le cheminement des ordres/informations ainsi que les marges d'actions des différents acteurs de la radioprotection dans nos établissements.

Dans tous les cas, nous devons garder à l'esprit la réalité opérationnelle, organisationnelle et financière de terrain. Nous avons cherché à faire des propositions réalistes, à anticiper l'accompagnement au changement, à utiliser des supports de communication internes adaptés, tout en restant en phase avec une réglementation en pleine refonte et en anticipant d'éventuelles évolutions (une étude approfondie des textes de loi a été nécessaire).

Voici donc nos propositions.

6.2. PROPOSITIONS FORMULEES

6.2.1. ASPECTS GENERAUX

6.2.1.1. INTEGRATION DANS LES DOCUMENTS RELATIFS A LA PREVENTION

Notre étude a démontré qu'un certain nombre de personnes ne sont en réalité pas concernées par le risque radioactif professionnel. Le résultat des études de postes devant être consigné dans le DUER, sa mise à jour devrait prendre en compte nos conclusions. Le plan de prévention régional pluriannuel, qui est une spécificité de notre organisme de recherche, devrait aussi dans sa prochaine version considérer ces aspects. Ces mises à jour devront intégrer la nécessité d'études de postes futures afin de généraliser la démarche de notre étude et de permettre une meilleure connaissance et individualisation de la prévention sur les postes de travail. Dans tous les cas, les interactions entre les RI et les autres risques professionnels devront être considérés.

6.2.1.2. POUVOIR DU CRP ET CLASSIFICATIONS

Le CRP (dans nos laboratoires, la PCR) est un maillon clé dans la chaîne de radioprotection. La PCR étant une experte dans son domaine, il convient de s'appuyer plus volontiers sur son avis quant aux classifications à observer plutôt que de lui demander de reproduire des protocoles formatés. C'est en théorie ce qui devrait déjà s'observer si l'on s'en tient à la réglementation, mais ce n'est pas toujours mis en pratique dans nos laboratoires, certaines « réserves » historiques « bridant » notamment la sortie de catégorie B, jugée plus « rassurante » (réserves rendues toutefois caduque par l'évolution de la réglementation). Nous proposons d'augmenter le poids décisionnel local des PCR, afin qu'elles puissent demander une déclassification de zones ou d'agents si celle-ci est justifiée (sur la base d'une étude de poste en particulier) et que cela soit appliqué.

Afin de changer ces pratiques et mentalités, une information émanant des instances de direction devrait être fournie aux décideurs locaux (DU en priorité) pour légitimer la démarche. Des moments d'échanges dédiés et privilégiés entre PCR et DU seraient souhaitables, les modalités et l'applicabilité restant à définir.

Il faudrait également encourager les PCR, dans la mesure du possible, à multiplier les études sur les postes de travail et les zones de manipulation afin de reconsidérer les classifications, et secondairement d'étayer le DUER. Cet élément est un prérequis important dans l'optimisation de la radioprotection. En effet, déclasser une zone injustement estimée comme « surveillée » ou un agent indûment considéré comme « exposé », permet de lever un certain nombre d'obligations réglementaires automatiquement déclenchées par cette classification (en particulier le suivi dosimétrique...). Cette démarche s'inscrirait dans le cadre réglementaire des « évaluations initiales » ou « contrôles périodiques » selon le cas.

Outre les simplifications dans les démarches et coûts en radioprotection, cette réévaluation permettrait de lutter contre l'idée reçue « tenace » que « présence de radioactivité implique nécessairement zone surveillée et personnel exposé ». De manière plus marginale, en contribuant à

rationaliser la réalité du risque radioactif, le dosimètre ne serait plus considéré comme un « protecteur magique ».

Dans tous les cas, il conviendra bien entendu de maintenir la signalisation des zones d'utilisation de RN, et la traçabilité des manipulations effectuées par chaque agent (cahiers de laboratoire individuels...) doit perdurer. Le réseau des PCR de nos laboratoires serait un bon moyen de diffusion de ces informations, de même que celui des assistants de prévention (spécificité dans la fonction publique). Ils exercent le rôle « prévention et sécurité » le plus proche du terrain car travaillent directement dans leur laboratoire et en fréquentent au quotidien les autres membres. De ce fait, ces fonctions représentent une voie majeure de communication et de relais ascendant et descendant des informations de prévention/santé au travail.

6.2.2. RADIOPROTECTION ET SUIVI DOSIMETRIQUE

6.2.2.1. GENERALITES

La substitution du marquage radioactif par des techniques sans RI (immunomarquage...) est actuellement impossible. L'évolution des techniques pourra certainement un jour le permettre. Une veille à ce sujet est à maintenir (rappelons que l'ASN demande nécessairement une justification à l'emploi de sources de RI pour réévaluer ses agréments).

Une réorganisation de la répartition des aliquotages pourrait permettre de limiter les flux de personnes entrant dans les zones de stockage des solutions mères. Il conviendrait d'améliorer la communication des équipes entre elles en termes de besoins en solutions de RN afin qu'une seule personne par équipe réalise les aliquots en zone surveillée, évitant la multiplication des manipulations et donc des potentielles situations accidentogènes. Cette personne ne relèverait probablement pas plus d'une catégorie B, il s'agit simplement d'appliquer un principe de précaution. Par ailleurs, il convient d'y promouvoir l'utilisation de pincettes et/ou de dispositifs permettant le pipetage/la manipulation à distance, cette étape mettant en jeu la plus grande activité (bien que l'exposition soit déjà bien contrôlée). De même, un meilleur fléchage des circuits permettrait de limiter les cheminements inutiles de personnel (notamment non classé) en zone surveillée.

6.2.2.2. CHOIX DE LA DOSIMETRIE INDIVIDUELLE

Pour les travailleurs non classés ou déclassés :

La réglementation demande la mise en place de « moyens appropriés afin de s’assurer que les limites du public ne sont pas dépassées » quand ces opérateurs sont amenés à cheminer en zone surveillée ou au-delà. Dans une configuration où les agents de notre étude seraient déclassés, mais pas certaines zones surveillées qu’ils fréquentent en conditions habituelles de travail, notre étude constitue un « moyen approprié » garantissant la non nécessité du port d’un dosimètre. Pour les autres travailleurs et/ou autres zones, il conviendra de se référer aux futures études de postes pour statuer.

Dans tous les cas, le retrait des dosimètres pour cette population devra être progressif et accompagné par les PCR et les AP afin que ce changement (qui remet en question des années d’habitudes prises) soit bien vécu, que la réalité scientifique derrière cette démarche soit bien comprise et que tout malentendu soit prévenu. Plusieurs alternatives sont à discuter. Nous proposons dans un 1^{er} temps, sous réserve de l’acceptation du déclassement des agents de notre étude, de retirer les dosimètres individuels uniquement sur les volontaires de cette population. Après une période d’observation et de transition (dont la durée reste à définir) le recul sur l’acceptabilité et le vécu de ces agents permettra de planifier une diffusion plus large de ces pratiques et de réaliser une communication aux autres laboratoires.

En parallèle, pendant cette même période, nous proposons que d’autres études de postes de travail similaires à ceux de notre étude aient lieu, afin de consolider la diffusion de ces nouvelles pratiques. Ces analyses intégreront des agents extérieurs à notre étude mais aux postes de travail similaires, et pourront ou non inclure une période de port de dosimétrie bague avant de conclure à une déclassification et à la non-pertinence du leur suivi dosimétrique. Nous laissons ce choix aux PCR concernées. Une autre campagne de dosimétrie bague similaire à notre étude mais plus large et interrégionale pourrait s’envisager.

Pour les travailleurs maintenus classés :

Qu'il s'agisse d'agents non encore déclassés ou « classés » à raison, la loi demande que leur dosimétrie réglementaire soit « adaptée aux caractéristiques des rayonnements ionisants auxquels sont susceptibles d'être exposés les travailleurs, notamment à leur énergie et leur intensité, ainsi qu'aux conditions d'exposition ». A ce titre, il conviendrait pour eux d'abandonner la dosimétrie de poitrine et de ne laisser en place que la dosimétrie d'extrémités au moyen de bagues (les dosimètres de poignet ou pastilles ne sont pas indiqués).

Cas particuliers :

Si un agent non classé devait exceptionnellement réaliser une manipulation « atypique » supposément plus exposante que celles considérées dans notre étude (sans pour autant être susceptible de le faire passer en catégorie B, sinon quoi il devrait être classé), l'emploi d'un dosimètre bague non nominatif dédié à cette manipulation ou d'un dosimètre opérationnel tracé pourrait se discuter. Ce cas de figure n'est à priori pas rencontré dans les laboratoires de l'étude. Les modalités seraient le cas échéant à définir au cas par cas par la PCR. Rappelons que des cas particuliers comme des dosimètres opérationnels sont prévus pour les accidents (même bénins) nécessitant une intervention humaine pour décontamination, les personnes aptes à intervenir étant par ailleurs consignées sur une liste limitative.

La substitution, pour les agents déclassés, de leur dosimètre poitrine par l'utilisation de bagues témoins fixées dans les enceintes de manipulation à une distance aux sources simulant une main, pourrait se discuter. Bien que non obligatoire, elle permettrait de maintenir à moindres coût et contraintes un monitoring durant une période de transition initiale pour en améliorer l'acceptabilité.

6.2.2.3. GUIDE DES BONNES PRATIQUES

Afin de proposer aux PCR une référence sur laquelle s'appuyer dans leurs évaluations et de permettre une certaine uniformisation des pratiques, nous proposons la mise au point d'un guide national indicatif, interne à notre organisme de recherche. Il s'agirait, pour la manipulation de RN non scellés courants et en conditions habituelles d'expérimentation, de définir pour chacun un seuil

d'exemption sans nécessité de monitoring dosimétrique. Ces recommandations seraient fonction de l'énergie de rayonnement (invariable) et de l'activité manipulée (variable), en supposant que la radioactivité reste localisée (solution non volatile...), et étayées par des experts techniques, les retours d'expérience et l'historique des suivis dosimétriques dans les différents laboratoires concernés.

En clair, en dessous de ces seuils d'activité, en l'état actuel des connaissances scientifiques, on admettrait un risque sanitaire négligeable pour l'opérateur (équivalent au risque de la population générale). Elles ne remplaceraient bien entendu pas l'analyse individuelle globale des risques réalisée par la PCR (qui prend en compte le travail dans sa globalité : EPC/EPI, coexpositions, risque accidentel...) mais donneraient une orientation rapide et une légitimité supplémentaire aux conclusions des PCR quant à sa décision de classification ou non d'un agent.

A titre purement indicatif, les PCR de notre équipe projet estiment qu'en conditions habituelles de travail en laboratoire de recherche, la manipulation de ^{32}P pour une activité $< 20\text{MBq}$ et celle de ^{35}S dans tous les cas ne nécessiteraient pas de suivi dosimétrique.

Ce projet plus ambitieux nécessitera d'être approfondi par les instances représentatives de prévention à l'échelle nationale de notre organisme de recherche. Le seuil de risque acceptable pour chaque RN devra être débattu. Un comité scientifique de rédaction devra probablement être formé.

6.2.2.4. REORIENTATION DU BUDGET

Notre étude questionne aussi l'utilisation des budgets alloués à la radioprotection. A supposer que des économies en dosimétries individuelles non justifiées soient réalisées à la suite du déclassement d'agents, nous avons identifié une cible prioritaire pour « réinjecter » cet argent : les contaminomètres (plus couramment appelés « compteurs geiger »). Nous l'avons démontré, l'exposition liée aux conditions de travail habituelles de notre population est insignifiante. Le seul risque radiologique théorique proviendrait d'une contamination cutanée passée inaperçue avec une solution marquée. Les dosimètres passifs ne seraient d'aucune utilité pour de tels incidents au contraire des contaminomètres, seuls dispositifs efficaces pour détecter une contamination surfacique.

Si les dosimétries individuelles devaient être supprimées chez les agents déclassés, il conviendra de maintenir absolument les auto/hétéro évaluations au contaminomètre portatif du corps des agents

et des paillasse avant et après chaque manipulation. Ces équipements, ont un coût de 2000€ en moyenne pour un détecteur et 300€ en moyenne pour un calibrage (à réaliser tous les 3ans). En comparaison, on estime grossièrement à environ 2800€ par an les économies de dosimétrie envisageables sur l'I1.

A part, nous avons pu observer pendant nos visites de postes une utilisation détournée de certains équipements comme « écrans de protection » (exemple : rack blindé de stockage de microtubes posée sur un temp bloc, voir étape 8 dans la figure 18). Bien qu'efficaces en stoppant effectivement les rayons β , ces « montages » demeurent contestables. L'acquisition de matériel disposant de capotages mieux adaptés est souhaitable, bien que moins prioritaire au vu des relevés dosimétriques.

Enfin, l'acquisition d'écrans miniatures intégrables aux pipettes pourrait être intéressante afin de limiter la zone de diffusion des RI lors des phases de pipetage (ils ne diffuseraient plus que vers le bas). Au vu des relevés dosimétriques, il ne s'agit pas non plus d'une priorité. Ces dispositifs devront le cas échéant être testés préalablement par les agents afin de s'assurer qu'ils ne rendent pas les manipulations trop contraignantes et longues à réaliser (ce qui augmenterait la durée d'exposition des zones toujours directement exposées). Un avis au cas par cas des PCR sera souhaitable afin de trouver un équilibre acceptable. Un exemple de ces dispositifs est présenté ci-contre.



Figure 30: Exemple de pipette à écran (1)

6.2.3. SUIVI MEDICAL

La déclassification d'agents a aussi pour conséquence de supprimer la nécessité d'un suivi médical particulier et donc celle de consultations rapprochées... si toutefois il n'existe pas de coexposition à d'autres risques qui le justifierait (produits CMR 1A ou 1B notamment étant donné le secteur d'activité...). Cette optimisation libère donc du temps médical à consacrer à des agents exposés à des risques plus importants et/ou à des actions en milieu de travail.

Dans tous les cas, mêmes pour des agents ayant été déclassés, un complément d'information sur les aspects prévention et sécurité au poste devra être maintenu par les services de santé au travail au

décours des visites, de même qu'un examen clinique orienté (recherche de pathologie susceptible de piéger une contamination interne, le risque que celle-ci se présente étant insignifiant mais non nul chez un opérateur manipulant des RN même sans être classé exposé...). La nécessité de recherche de pathologie radio-induite serait cependant rendue caduque (hors exposition antérieure > seuil public).

6.2.4. INFORMATION AUX AGENTS

Un agent classé exposé à la radioactivité doit, selon la réglementation (voir détails en 1.2.3.1) bénéficier d'une formation. Nous proposons de maintenir une information aux agents déclassés manipulant de la radioactivité, pour les mêmes raisons que celles invoquées pour justifier un retrait progressif des dosimètres (voir 6.2.2.2.).

Cette information devra aborder les mêmes points que ceux demandés par l'article R4451-58 (48) mais adaptés à la configuration « non exposé » (*adaptations proposée en italique*) :

- Caractéristiques des RI (*énergie, trajet, zones du corps exposées, pénétrance...*)
- Effets sur la santé (*comment la radiophysique permet d'écarter le danger*)
- Effets sur l'embryon (*non exposé en condition normales de travail, rayons β non pénétrants*)
- Nom et coordonnées du CRP
- Mesures de préventions (*absolue nécessité de maintenir l'usage des EPI/EPC et bonnes pratiques de manipulation (voir (2) fiche 18), garants de l'absence de nécessité de classification « exposé » ; le retrait de dosimètres ne doit en effet pas s'accompagner d'un « laisser aller », un danger peut être présent, mais les bonnes pratiques garantissent l'absence d'exposition, donc de risque*)
- Conditions d'accès en zone (*nécessité ou non selon le cas du port d'un dosimètre*)
- Règles particulières pour femmes enceintes, allaitantes, jeunes, CDD, ETT (*idem public*)
- Modalité de surveillance et accès aux résultats dosimétriques (*pourquoi ils ne sont pas concernés*)
- Conduite à tenir en cas d'accident ou d'incident

En plus, nous proposons d'insérer des éléments complémentaires sur certaines idées reçues :

- *Indication et limites des dosimètres (image du « dosimètre protecteur quand il est porté » alors qu'il ne détecte pas tout et n'est qu'un indicateur...)*

- Réaffirmer la plus grande utilité des contaminomètres sur ces postes de travail
- Quelques statistiques (58,60), éléments d'interprétation de dosimétries, résultats de notre étude
- Réassurance par rapport à la coactivité pour les agents ne manipulant pas directement de RI

La rédaction d'une plaquette informative reprenant ces éléments serait souhaitable. Cette information devrait dans l'idéal se faire via le réseau des PCR, des médecins de prévention, des AP et/ou au décours des formations obligatoires sur la radioprotection. Il serait préférable que ces campagnes d'information soient légitimées par des communications des DU ou responsables régionaux. Il conviendra de les proposer en français et anglais étant donné les spécificités linguistiques de notre population de laboratoire.

6.2.5. OBSTACLES PREVISIBLES

Plusieurs éléments pourraient mettre à mal la faisabilité de nos propositions et devront être discutés. Nous avons principalement identifié les points suivants :

- 1) Un éventuel passage à une dosimétrie bague pour les agents maintenus classés s'accompagnera de la nécessité d'un nouvel enregistrement auprès de l'IRSN/SISERI, d'un changement de base de données +/- de certains logiciels, ce qui est une démarche contraignante. Par ailleurs, le prix de la dosimétrie bague est d'environ 2x celui de la dosimétrie de poitrine (néanmoins, ces coûts seraient largement compensés par la réduction importante du parc de dosimètres de poitrine).
- 2) La réalisation d'études de poste par les PCR est une démarche chronophage, d'autant que la plupart du temps elles exercent cette fonction en plus de leur affectation principale. Si l'on souhaite que la révision des classifications de zones et d'agents avance suffisamment vite, il conviendra de dégager du temps dédié pour les PCR concernées, mais aussi de valoriser cette mission, qui dépasse la « simple » mise en conformité réglementaire. A défaut de pouvoir tout analyser, il conviendra de cibler les éléments prioritaires, en particulier la classification des zones, car ayant des conséquences collectives.
- 3) Bien que nous ayons essayé de l'anticiper dans notre plan d'action, l'importance d'une éventuelle « résistance au changement » dans les mentalités des agents, habitués à leurs pratiques depuis

des années, est impossible à prévoir a priori. Les contacts que nous avons pu avoir avec le terrain avant, pendant et après notre étude laissent cependant à penser qu'un bon nombre de personnes accueilleraient favorablement cet allègement des contraintes et seraient en demande de ce changement.

- 4) L'application de nos propositions devra bien entendu se faire dans le respect de la réglementation sur la radioprotection. Celle-ci étant en pleine période de transition, la vision sur son évolution à court terme est limitée. Cependant, on observe nettement une tendance vers la simplification et la révision d'anciennes normes devenues contraignantes car mal adaptées aux réalités de terrain actuelles, ce qui va dans le sens de notre propre démarche. Il est ainsi tout à fait probable que tous ces éléments soient compatibles.

6.3. COMMUNICATION DES RESULTATS

6.3.1. RESTITUTION AUX AGENTS

Les PCR du groupe projet ont pu restituer aux agents les 1ères conclusions de notre étude après la réception et les 1ers éléments de discussion des résultats dosimétriques. Nous avons pu apporter aux agents les éléments factuels attestant de leur « vraie » sécurité, la question de leur exposition aux extrémités étant en suspens. Une restitution plus détaillée (tous les éléments de discussion, propositions d'évolution...) ultérieure est prévue, qui pourra d'ailleurs inclure aussi les autres membres des instituts inclus concernés par la manipulation de ³²P.

6.3.2. SEMINAIRE DES PCR

Notre étude a fait l'objet d'une 1^{ère} présentation « officielle » au séminaire régional bisannuel des PCR de notre organisme de recherche de rattachement, le 29/11/2018, auquel assistait la majorité des agents interagissant de près ou de loin avec le suivi dosimétrique des personnels dans notre périmètre de prévention (PCR, ingénieurs sécurité, médecins de prévention...). Tous les éléments de l'étude n'étaient cependant pas encore disponibles à cette date, notamment les questionnaires post étude et certains éléments de discussion et préconisations. Nous avons néanmoins pu déjà trancher certaines questions laissées en suspens et confirmer les intuitions de bon nombre de PCR.

Les échanges ayant suivi ont permis d'orienter et d'affiner certaines des préconisations que nous avons faites par la suite, différentes PCR faisant état des spécificités et/ou besoins d'évolution des pratiques dans leurs propres laboratoires.

6.3.3. CRHSCT

La version finale des conclusions et préconisations de notre étude a été présentée à notre CHSCT régional d'affectation (où s'est déroulé l'étude) le 18/06/2019 en présence notamment de représentants du personnel, de chefs de service, de membres des services de prévention et du directeur administratif. L'assemblée s'est accordée sur le bien-fondé de la nécessité d'une évolution des pratiques en matière de suivi en radioprotection. Les premières discussions ont eu lieu sur les grandes lignes à tracer à partir de nos préconisations. (Note : nos laboratoires relevant de la fonction publique d'Etat, la bascule vers les CSE/CSSCT n'est pas en place).

6.3.4. NATIONALE

Les résultats et préconisations de notre étude ont été diffusés en interne aux instances représentatives nationales de médecine de prévention, de prévention/sécurité et à la mission nationale radioprotection de notre organisme de recherche.

Cette mission nationale coanime en particulier des groupes de travail sur la mise en pratique dans l'établissement des récentes évolutions réglementaires et l'optimisation des pratiques. Elle a fait savoir qu'elle utiliserait notre étude comme une de ses bases de réflexion.

6.4. PROJECTIONS

La communication autour de notre étude va se poursuivre. Elle a notamment été retenue pour être présentée à l'occasion d'un séminaire national de médecine de prévention organisé pour les 80 ans du CNRS prévu le 18/10/2019 qui regroupera des médecins de prévention issus de divers secteurs de la fonction publique ainsi que des acteurs d'entités de prévention. Il est d'autre part prévu qu'elle fasse l'objet d'une publication dans le journal national de prévention et sécurité interne à notre organisme de recherche. Ce journal traite des actions et études ayant trait à la santé et la sécurité au travail.

Après mise en place -comme nous l'espérons- des nouvelles pratiques, il conviendra en temps voulu de définir un plan de contrôle et de suivi, afin d'opérer aux ajustements et évolutions nécessaires, dans une optique de retour d'expérience et d'amélioration continue.

Si notre étude a pu voir le jour, c'est avant tout à la suite d'une remontée d'information de terrain, que les services compétents ont su concrétiser par un travail d'investigation et de recherche. Ce contact avec les acteurs de terrain, leurs intuitions et doléances est un élément clé de la démarche de prévention qu'il conviendra de poursuivre et de favoriser.

Les discussions en rapport avec les suites concrètes qui seront données à notre étude n'en sont encore qu'à leurs balbutiements. Les décideurs concernés ont les cartes en main. Notons néanmoins que ce point de réflexion a d'ores et déjà été inscrit officiellement au prochain plan de prévention 2019-2020 de notre délégation régionale au sein de notre organisme de recherche. Nous espérons que notre étude pourra servir de socle informatif et comparatif pour les autres PCR et laboratoires, afin de guider de futures études complémentaires et évolutions des pratiques, à l'échelle locale et nationale. Un authentique changement de paradigme semblerait justifié, c'est par ailleurs l'orientation que semble prendre la réglementation.

CONCLUSION

L'utilisation des rayonnements ionisants dans les laboratoires de recherche n'est pas rare. Elle peut être très variable selon le sujet d'investigation du moment, tantôt occasionnelle, tantôt très fréquente. Cette variabilité rend difficile la tâche des préventeurs des risques professionnels, qu'il s'agisse des ingénieurs en sécurité, des personnes compétentes en radioprotection ou des médecins du travail.

Dans ce travail de thèse, l'objectif était de mieux connaître l'exposition au ^{32}P dans des laboratoires de biologie moléculaire. Bien que relativement courantes, ces situations de travail sont peu décrites dans la littérature scientifique. Ce radionucléide γ est principalement utilisé comme marqueur de sondes ADN ou ARN. Cette source radioactive étant bien identifiée, un certain nombre de moyens de prévention était déjà mis en place, ainsi que, pour les opérateurs concernés, une classification en « travailleur exposé de catégorie B » avec port de dosimètres de poitrine trimestriels. L'analyse de ces derniers montrait une stricte négativité des résultats depuis de nombreuses années.

L'étude de différents postes de travail, mis en perspective avec les caractéristiques radiophysiques des sources manipulées, a permis de mettre en évidence que le thorax des utilisateurs présentait en théorie une exposition insignifiante, mais qu'en revanche leurs mains semblaient plus exposées. Le risque accidentel « raisonnablement prévisible » identifié était toutefois minime. L'hypothèse suivante a donc été posée sur ces postes de travail en condition habituelles de manipulation : « Les dosimètres de poitrine sous-estiment l'exposition professionnelle réelle des agents, les conditions de travail (notamment du fait des moyens de prévention déjà en place) rendant leur impaction improbable. L'exposition réelle est concentrée aux extrémités, à des niveaux pouvant être détectables ».

Nos objectifs étaient de démontrer ici la meilleure représentativité de la dosimétrie bague, de statuer sur le risque radiologique professionnel réel des agents afin d'adapter leur information, catégorisation, suivi médical et dosimétrique et enfin de constituer une étude pilote afin que ce retour d'expérience puisse faire évoluer les pratiques localement mais aussi plus largement.

Après constitution d'une équipe projet pluridisciplinaire médico-technique, un protocole d'étude a été mis en place. Nos critères d'inclusion pour les biologistes moléculaires volontaires étaient la

susceptibilité de manipuler en monoexposition du ^{32}P pendant la durée de l'étude et l'appartenance à un institut faisant partie du périmètre de suivi de notre service de médecine de prévention, avec un accord donné par leur directeur d'unité et PCR. Afin d'apprécier au mieux l'exposition de leurs extrémités, il a été convenu d'équiper chaque agent inclus de deux dosimètres bagues personnels et latéralisés pendant 6 mois, portés à la 1^{ère} phalange de chaque index, sous les gants, cible orientée vers la paume de main et ce à chaque manipulation exposant au ^{32}P . En parallèle, chaque agent portait son dosimètre de poitrine habituel. Des dosimètres témoins ont été mis en place afin de soustraire la part d'exposition liée à la radioactivité naturelle. Pour des raisons techniques empêchant un parallélisme exact des périodes de port, pour chaque agent les 6 mois de dosimétrie bague ont été comparés à trois trimestres consécutifs de dosimétrie poitrine les englobant. Chaque agent devait décrire brièvement chacune de ses manipulations dans un tableau. Enfin, un questionnaire post étude a été distribué.

Chaque dosimètre était analysé via le calcul suivant : exposition mesurée par le dosimètre porté – exposition mesurée par le dosimètre témoin correspondant. Si cette différence était supérieure ou égale au seuil d'enregistrement du dosimètre (0.05mSV pour les dosimètres poitrine, 0.1mSv pour les bagues), celui-ci était considéré comme étant positif et cette différence était retenue comme l'exposition professionnelle. Dans le cas contraire, le résultat du dosimètre était jugé non significatif, la valeur retenue étant alors 0mSv. Pour les dosimètres de poitrine, seule la valeur donnée en pondération hp0.07 (dose équivalente peau) était considérée (la dose efficace en hp10 n'étant pas adaptée pour les rayons β du ^{32}P). Nous avons utilisé la variable qualitative de la positivité/négativité de la dosimétrie des agents. Un agent était considéré « positif bague » si au moins 1 de ses 2 bagues était positive et « positif poitrine » si au moins 1 de ses 3 dosimètres de poitrine était positif.

Le critère de jugement principal a été de retrouver une différence statistiquement significative entre le nombre d'agents « positifs bague » versus « positifs poitrine » (comparaison effectuée via un modèle de régression logistique avec effet aléatoire par sujet et correction de Firth). Des calculs secondaires ont aussi été réalisés pour comparer statistiquement : les valeurs dosimétriques des bagues selon la nature de la main (dominante ou non dominante), les valeurs bagues mesurées entre

les instituts et enfin pour chaque agent les valeurs bagues mesurées versus celles des doses prédictives calculées sur la base de leur tableau de suivi.

Au final, 17 agents issus de 2 instituts éligibles ont pu être inclus pour une observation entre avril et octobre 2018. 2 agents n'ont pas manipulé de ^{32}P pendant cette période (aucun ne présentait de bague positive). Sur les bagues restantes, 10 sur 30 (8 agents sur 15) sont revenues positives, avec une mesure d'exposition professionnelle maximum de 0.55mSv et une moyenne située entre 0.07 et 0.14mSv (incertitude apportée par le seuil d'enregistrement). Aucun dosimètre de poitrine n'est revenu positif. La comparaison des agents positifs pour chaque type de dosimètre retrouvait une différence très significative ($p \approx 0.001$) en faveur des dosimètres bagues. Les mains dominantes (pipetantes) étaient statistiquement 3 fois moins exposées, soit environ -0.1mSv (-0.103 [-0.177 ; -0.029] $p = 0.011$). Nous n'avons pas retrouvé de différence significative d'exposition entre les 2 instituts de l'étude ni dans la comparaison valeurs mesurée versus valeurs prédictives calculées, bien que celles-ci aient été entre 3 et 63 fois plus grandes, probablement du fait d'un manque de puissance (seulement 6 tableaux ont pu être exploités pour ce calcul). 15 questionnaires post-étude ont été rendus, indiquant une très bonne observance, une absence de coexposition susceptible d'impacter les résultats, un inconfort important lié au port des bagues et une activité de manipulation sur la période d'étude légèrement inférieure à celle habituelle.

Les mesurages réalisés étaient bien inférieurs au seuil d'exposition du public pour les extrémités (50mSv). En exploitant l'ensemble de nos données, nous avons pu estimer puis appliquer des marges de sécurité à ces résultats afin de simuler l'exposition la plus péjorative possible en routine, qui ne dépassait pas non plus ce seuil. Nous avons ainsi pu démontrer la meilleure représentativité d'une dosimétrie d'extrémités et l'inutilité apparente de celle de poitrine mais aussi que la classification « travailleur exposé » de notre population d'étude (et donc la nécessité d'un suivi dosimétrique) pouvait être remise en question. Si certains biais techniques et/ou méthodologiques peuvent avoir influé modérément sur le nombre de bagues positives, les conclusions « pratiques » et « opérationnelles » sur la classification des agents auraient été inchangées du fait des faibles gammes de mesures dans les laboratoires de notre étude.

A partir des résultats de cette étude, il a pu être formulé un ensemble de propositions visant à optimiser leurs pratiques en radioprotection, le suivi dosimétrique et médical de leurs agents, la connaissance de leur exposition ainsi que les informations qui devraient leur être délivrées. Ces propositions devront toutefois trouver leur place au sein des évolutions récentes et futures de la réglementation en matière de radioprotection et être expliquées aux salariés. Les conclusions ne remettent pas en question l'usage des équipements de protection collective et individuelle et les bonnes pratiques de manipulation mais au contraire confirment leur efficacité. L'hypothèse émise a donc pu être validée.

La transposition de nos résultats à d'autres laboratoires de biochimie utilisant du ^{32}P sera probablement possible avec certaines précautions mais ne dispensera pas les préventeurs d'étudier ces postes de travail.

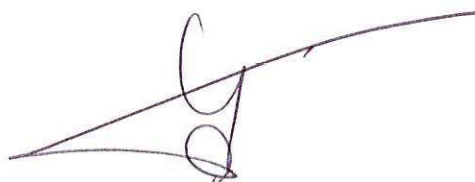
Pour finir, cette étude a montré, si cela était encore à prouver, que sur des sujets aussi techniques, la complémentarité des compétences des différents acteurs de la santé et sécurité au travail est non seulement utile mais surtout indispensable.

VU

Strasbourg, le 7 juillet 2019

Le président du Jury de Thèse

Professeur Maria GONZALEZ



VU et approuvé

Strasbourg, le 12 JUL. 2019

Le Doyen de la Faculté de Médecine de Strasbourg

Professeur Jean SIBILIA



ANNEXES

Annexe 1 : Plaquette d'information distribuée aux agents inclus dans l'étude

PLAQUETTE D'INFORMATION ETUDE DOSIMETRIE ³²P

CONTEXTE ET HYPOTHESE

Les dosimètres de poitrine des agents manipulant des sources β dures (³²P) non scellées affichent systématiquement un résultat négatif. Réelle protection ou mesure biaisée ?

Notre hypothèse est que la dosimétrie torse est une mauvaise représentation de la dose reçue dans ce type de manipulations. Le rayonnement β , de par ses caractéristiques, est probablement arrêté (écrans plexi, air...) avant d'impacter ledit dosimètre et est probablement concentré aux extrémités. Une dosimétrie d'extrémité apparaîtrait plus pertinente.

PRINCIPE DE L'ETUDE

- Focus sur manipulations de ³²P (émetteur β assez puissant pour impacter un dosimètre)
- 2 lieux : [REDACTED] et [REDACTED], 5-10 agents/labo
- Mesure comparative par dosimètre poitrine (3 trimestres) et bague (6 mois consécutifs)
- Recueil d'informations sur la vraisemblance des résultats et les marges de sécurité à leur appliquer
- Lecture des dosimètre, extrapolation, comparaison aux normes réglementaires...

CE QUI VOUS SERA DEMANDE

- Fournir vos protocoles de manipulation impliquant le ³²P à votre PCR et leur planning prévisionnel de réalisation (si disponible) sur la période d'étude
- Deux dosimètres bagues numérotés strictement personnels et latéralisés vous seront fournis, ils seront à porter pendant les manipulations exposantes au ³²P, sous les gants, à la 1^{ère} phalange des index, cible orientée vers la paume de mains ; en dehors ils seront à conserver dans un endroit radiologiquement neutre
- Votre dosimètre poitrine sera porté comme à votre habitude
- Vous devrez remplir votre tableau d'exposition à chaque manipulation exposante au ³²P (cf consignes qui vous seront données par votre PCR)

OBJECTIFS

- 1) Démontrer la meilleure représentativité de la dosimétrie bague dans la population cible
- 2) Statuer sur le risque radiologique réel au niveau des extrémités et y adapter les actions de radioprotection et le suivi médical
- 3) Constituer une étude pilote pour argumenter une évolution des pratiques dans d'autres laboratoires du [REDACTED]

Contacts :

Cette étude est initiée par le Service de Médecine de Prévention [REDACTED] en partenariat avec le Service Prévention et Sécurité ainsi que les PCR de vos laboratoires.

Adresse générique commune (privilégier+++)

Etude32p@ [REDACTED]

SMP

D. [REDACTED] (chef de service)

[REDACTED]
EHOSSANNI (intérimaire)
(coordonnateur de l'étude ³²P)

[eric.hossanni@ \[REDACTED\]](mailto:eric.hossanni@ [REDACTED])

SPS

[REDACTED] (CM Radioprotection)

[REDACTED]

PCR [REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

PCR [REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

Annexe 2: Exemple de tableau de suivi (modèle finalement utilisé qu'à l'11)

Manipulation exposante	Protocole dont elle est issue	Date expérience	Volume pipeté <input type="text"/>	Durée de manipulation <input type="text"/>	Activité supposément manipulée	Commentaire

Annexe 3: Tableau de suivi utilisé à l'12

Potocole Type	Date	Activité manipulée (microCi)	Réplicats	Durée (H)	Commentaire

TLD BAGUE ETUDE DE POSTE

BILAN DE LA PERIODE EN DATE DU 15/10/2018								
Nombre de dosimètres TLD bague Etude de Poste dans le service sur la période							35	
Nombre de dosimètres TLD bague Etude de Poste de la période non retournés au laboratoire							0	
DETAIL DES ANALYSES								
Code UD: R11690201								
Identification du dosimètre	Numéro dosimètre	Date de début d'utilisation	Date de réception des dosimètres	Rayonnement	Information énergie (keV)	Equivalent de dose (1) mSv		Validé Par
						Hp(10)	Hp(0.07)	
AA-TEMOIN ETUDE	31238	10/04/2018	11/10/2018	X, gamma, beta	Inconnue		0,27	GEN
MAIN DROITE	1407	10/04/2018	11/10/2018	X, gamma, beta	Inconnue		0,33	GEN
MAIN DROITE	9156	10/04/2018	11/10/2018	X, gamma, beta	Inconnue		0,28	GEN
MAIN DROITE	11115	10/04/2018	11/10/2018	X, gamma, beta	Inconnue		0,39	GEN
MAIN DROITE	13474	10/04/2018	11/10/2018	X, gamma, beta	Inconnue		0,33	GEN
MAIN DROITE	15053	10/04/2018	11/10/2018	X, gamma, beta	Inconnue		0,31	GEN
MAIN DROITE	18989	10/04/2018	11/10/2018	X, gamma, beta	Inconnue		0,29	GEN
MAIN DROITE	30762	10/04/2018	11/10/2018	X, gamma, beta	Inconnue		0,25	GEN
MAIN DROITE	31385	10/04/2018	11/10/2018	X, gamma, beta	Inconnue		0,30	GEN
MAIN DROITE	37192	10/04/2018	11/10/2018	X, gamma, beta	Inconnue		0,34	GEN
MAIN DROITE	38666	10/04/2018	11/10/2018	X, gamma, beta	Inconnue		0,40	GEN
MAIN DROITE	43476	10/04/2018	11/10/2018	X, gamma, beta	Inconnue		0,26	GEN
MAIN DROITE	43687	10/04/2018	11/10/2018	X, gamma, beta	Inconnue		0,32	GEN
MAIN DROITE	45655	10/04/2018	11/10/2018	X, gamma, beta	Inconnue		0,26	GEN
MAIN DROITE	47169	10/04/2018	11/10/2018	X, gamma, beta	Inconnue		0,26	GEN
MAIN DROITE	48947	10/04/2018	11/10/2018	X, gamma, beta	Inconnue		0,32	GEN
MAIN DROITE	49645	10/04/2018	11/10/2018	X, gamma, beta	Inconnue		0,29	GEN
MAIN DROITE	60013	10/04/2018	11/10/2018	X, gamma, beta	Inconnue		0,41	GEN
MAIN GAUCHE	2780	10/04/2018	11/10/2018	X, gamma, beta	Inconnue		0,32	GEN
MAIN GAUCHE	4794	10/04/2018	11/10/2018	X, gamma, beta	Inconnue		0,41	GEN
MAIN GAUCHE	11396	10/04/2018	11/10/2018	X, gamma, beta	Inconnue		0,48	GEN
MAIN GAUCHE	17403	10/04/2018	11/10/2018	X, gamma, beta	Inconnue		0,35	GEN
MAIN GAUCHE	21170	10/04/2018	11/10/2018	X, gamma, beta	Inconnue		0,31	GEN
MAIN GAUCHE	22272	10/04/2018	11/10/2018	X, gamma, beta	Inconnue		0,32	GEN
MAIN GAUCHE	27821	10/04/2018	11/10/2018	X, gamma, beta	Inconnue		0,47	GEN
MAIN GAUCHE	29172	10/04/2018	11/10/2018	X, gamma, beta	Inconnue		0,32	GEN
MAIN GAUCHE	29461	10/04/2018	11/10/2018	X, gamma, beta	Inconnue		0,30	GEN
MAIN GAUCHE	31688	10/04/2018	11/10/2018	X, gamma, beta	Inconnue		0,31	GEN
MAIN GAUCHE	33607	10/04/2018	11/10/2018	X, gamma, beta	Inconnue		0,34	GEN
MAIN GAUCHE	45705	10/04/2018	11/10/2018	X, gamma, beta	Inconnue		0,82	GEN
MAIN GAUCHE	57883	10/04/2018	11/10/2018	X, gamma, beta	Inconnue		0,34	GEN
MAIN GAUCHE	87942	10/04/2018	11/10/2018	X, gamma, beta	Inconnue		0,37	GEN
MAIN GAUCHE	87956	10/04/2018	11/10/2018	X, gamma, beta	Inconnue		0,51	GEN
MAIN GAUCHE	88275	10/04/2018	11/10/2018	X, gamma, beta	Inconnue		0,59	GEN
MAIN GAUCHE	97679	10/04/2018	11/10/2018	X, gamma, beta	Inconnue		0,26	GEN

Annexe 5: Résultats détaillés du questionnaire post-étude

Horodateur	1/29/2019 10:57:18	1/29/2019 11:27:05	1/29/2019 11:42:03	1/29/2019 11:42:15	1/29/2019 11:43:17	1/29/2019 11:44:34
A quel institut de l'étude appartenez-vous?	I1	I1	I2	I2	I2	I2
Lors des manipulations nécessitant du pipetage, de quelle main tenez-vous la pipette?	droite	droite	droite	droite	gauche	droite
1) Pendant la durée de l'étude (avril - octobre 2018) lorsque vous portiez les dosimètres BAGUE (et seulement à ces moments) avez vous manipulé directement ou été exposé indirectement à d'autres radioéléments que le 32P ?	oui	non	non	non	non	non
Si vous avez répondu "oui" à la question 1, merci de préciser au(x)quel(s) et si possible (même approximativement) le nombre de fois et de quelle manière (forme physicochimique, activité théorique, mesures de radioprotection -écrans etc...)	méthionine 35-S liquide - écran plexi - demi vie : 87 jours - 1fois/semaine					
2) A partir de février 2018, aux moments où vous portiez votre dosimètre DE POITRINE, avez vous manipulé directement ou été exposé indirectement à d'autres radioéléments que le 32P ?	Oui	non	non	non	non	non
Portiez vous aussi votre dosimètre de poitrine en dehors des moments où vous portiez vos dosimètres bague?	Oui, en permanence sur ma blouse	Oui, en permanence sur ma blouse	Non	Oui, rarement	Oui, en permanence sur ma blouse	Non
Portiez vous votre dosimètre de poitrine pendant toutes les manipulations de 32P?	Oui, systématiquement	Oui, systématiquement	Oui, systématiquement	Oui, systématiquement	Oui, systématiquement	Oui, systématiquement
Si besoin d'apporter une précision supplémentaire, vous pouvez vous exprimer ici.				Les dosimètres de poitrines ne sont pas arrivés en même que les autres.	Les dosimètres bagues étaient en permanence dans ma poche de blouse.	
Si vous avez répondu "oui" à la question 2, merci de préciser au(x)quel(s), à quelle période de l'année et si possible (même approximativement) le nombre de fois et de quelle manière (forme physicochimique, activité théorique, mesures de radioprotection...)	méthionine 35-S liquide - écran plexi - demi vie : 87 jours - 1fois/semaine					
3) Pendant la durée de l'étude (avril - octobre 2018), il vous était demandé de porter vos deux dosimètres bagues sous votre paire de gants, cibles orientées côté paume de la main, à chaque manipulation potentiellement exposante au 32P. Ces consignes ont-elle pu être respectées ?	oui, à chaque manipulation potentiellement exposante au 32P	rarement	oui, à chaque manipulation potentiellement exposante au 32P	oui, à chaque manipulation potentiellement exposante au 32P	oui, à chaque manipulation potentiellement exposante au 32P	oui, à chaque manipulation potentiellement exposante au 32P
Si vous avez répondu "oui, la plupart du temps" ou "rarement" à la question 3, merci de préciser quelles anomalies sont concernées et à quelle fréquence approximative elles ont été rencontrées		absence de port du dosimètre droit, absence de port du dosimètre gauche, anomalie(s) présente(s) dans 50 à 75% des manipulations exposant au 32P				
Si besoin de précisions supplémentaires vous pouvez l'écrire ici.		Je ne pouvez plus les porter car j'ai beaucoup de problèmes de peau et ça me fessait très mal de les avoir aux doigts				
4) Toutes les manipulations exposant au 32P pendant la durée de l'étude ont-elles été renseignées sur votre tableau de suivi?	oui	non	oui	oui	oui	oui
Si vous avez répondu "non" à la question 4, merci de préciser le pourcentage approximatif de manipulations renseignées sur votre tableau de suivi par rapport au nombre réel de manipulations exposant au 32P effectuées pendant la période d'étude?		75%				
Si vous jugez nécessaire de préciser plus, vous pouvez vous exprimer ici.		j'ai noté seulement les expérience réalisés avec les bagues et dosimètre poitrine. Pour les expériences avec seulement dosimètre poitrine je ne les ai pas noté				
5) Comment estimez-vous subjectivement la contrainte liée au port des dosimètres bagues (temps passé pour l'enfilage/désenfilage, influence sur dextérité, sensation de serrement du doigt...) indépendamment de son bénéfice en matière de prévention	moyennement contraignant	très contraignant	peu contraignant	peu contraignant	peu contraignant	peu contraignant
6) Si vous deviez comparer approximativement le volume de manipulations exposantes au 32P que vous avez effectués pendant les 6 mois de l'étude par rapport au volume habituel moyen que vous effectuez?	Pendant les 6 mois de l'étude, j'ai manipulé le 32P à peu près autant que d'habitude	Pendant les 6 mois de l'étude, j'ai manipulé le 32P à peu près autant que d'habitude	Pendant les 6 mois de l'étude, j'ai manipulé le 32P un peu moins par rapport à d'habitude	Pendant les 6 mois de l'étude, j'ai manipulé le 32P un peu moins par rapport à d'habitude	Pendant les 6 mois de l'étude, j'ai manipulé le 32P à peu près autant que d'habitude	Pendant les 6 mois de l'étude, j'ai manipulé le 32P à peu près autant que d'habitude
7) Y a-t-il des incidents d'exposition radiologiques à signaler entre le 01/01/2018 et le jour où vous remplissez ce questionnaire? (tube contenant une solution radioactive renversé...) si oui merci de préciser ci-dessous.	non	non	non	non	non	non
Espace pour préciser si nécessaire.						
8) Les dosimètres bague ont-ils été stockés dans une zone radiologiquement neutre (radioactivité mesurée = radioactivité naturelle) en dehors des manipulation de 32P?	oui, tout le temps	oui, tout le temps	oui, tout le temps	oui, tout le temps	oui, tout le temps	oui, tout le temps
Merci de décrire ici brièvement comment vous avez conservé vos dosimètres en dehors des périodes de manipulation: type de contenant (ex: boîte en plastique fermée ou sans couvercle, à l'air libre...) lieu de stockage (ex: dans le tiroir de mon bureau, dans mon casier, sur une paillasse...) si les dosimètres ont été stockés ensemble ou séparément, si il y a eu des changements notables au cours de l'étude.	ensemble à l'air libre, sur ma paillasse, dans mon pot à marqueurs	a mon bureau	La radioactivité n'a pas été mesurée mais mes dosimètres étaient stockés dans le laboratoire, normalement radiologiquement neutre. Ils étaient ensemble dans un casier au dessus de ma paillasse, à l'air libre.	dans une pochette en plastique, dans le tiroir de mon bureau, ensemble, pas de changement notable	Dans la poche de la blouse	sur mon bureau
Dans ce cas, pouvez vous estimer le pourcentage du temps où les dosimètres n'ont pas été stocké en zone neutre, et quelles étaient les caractéristiques de cette zone non neutre? (zone contrôlée? proximité d'une source radioactive?...)	RAS	non	/	les dosimètres ont été stocké en zone neutre, tiroir de paillasse	0%	Les dosimètres étaient toujours stockés en zone neutre (sur mon bureau) sauf en cas d'utilisation pour les manipulations de 32P.
Dans cette section vous pouvez laisser tout commentaire que vous jugerez utile concernant l'étude dosimétrique. En vous remerciant cordialement pour votre participation à ce questionnaire.	les dosimètres bagues serrent un peu trop les doigts, qui deviennent limite bleus !			Les bagues sont moins contraignantes que les dosimètres de poignets.		

1/29/2019 14:52:05	1/29/2019 15:21:46	1/29/2019 16:02:58	1/29/2019 16:12:16	1/29/2019 16:29:18	1/31/2019 20:34:18	2/5/2019 10:06:03	2/26/2019 16:47:58	3/14/2019 19:08:59
I1	I2	I1	I1	I1	I2	I1	I2	I1
droite	gauche	droite	droite	droite	droite	droite	droite	droite
non	oui	non	non	non	non	non	non	non
	S35, derrière un écran							
non	non	non	non	non	non	non	non	non
Oui, en permanence sur ma blouse	Non	Non	Oui, en permanence sur ma blouse	Oui, en permanence sur ma blouse	Non	Oui, en permanence sur ma blouse	Oui, en permanence sur ma blouse	Oui, rarement
Oui, systématiquement	Oui, systématiquement	Oui, systématiquement	Oui, systématiquement	Oui, systématiquement	Pas systématiquement, mais au moins 90% du temps	Oui, systématiquement	Oui, systématiquement	Pas systématiquement, mais au moins 90% du temps
						Dosimètre bague pas porté en permanence lors des manipulation P32 (oubli), mais estimé à 80-90%.		
oui, à chaque manipulation potentiellement exposante au 32P	oui, à chaque manipulation potentiellement exposante au 32P	oui, à chaque manipulation potentiellement exposante au 32P	oui, à chaque manipulation potentiellement exposante au 32P	oui, la plupart du temps	non concerné(e) car pas manipulé de 32P pendant la durée de l'étude	oui, la plupart du temps	oui, à chaque manipulation potentiellement exposante au 32P	oui, à chaque manipulation potentiellement exposante au 32P
				anomalie(s) présente(s) dans 10 à 25% des manipulations exposant au 32P		cibles des dosimètres orientées ailleurs que vers la paume de main, anomalie(s) présente(s) dans < 10% des manipulations exposant au 32P		
						Le port de la bague est gênant / douloureux à la longue.		
oui	oui	oui	oui	oui	non concerné car pas manipulé de 32P pendant la durée de l'étude	oui	oui	oui
très contraignant	moyennement contraignant	peu contraignant	peu contraignant	moyennement contraignant	non concerné car pas manipulé de 32P pendant la durée de l'étude	très contraignant	non contraignant	peu contraignant
Pendant les 6 mois de l'étude, j'ai manipulé le 32P beaucoup moins par rapport à d'habitude	Pendant les 6 mois de l'étude, j'ai manipulé le 32P à peu près autant que d'habitude	Pendant les 6 mois de l'étude, j'ai manipulé le 32P un peu moins par rapport à d'habitude	Pendant les 6 mois de l'étude, j'ai manipulé le 32P beaucoup moins par rapport à d'habitude	Pendant les 6 mois de l'étude, j'ai manipulé le 32P à peu près autant que d'habitude	Pendant les 6 mois de l'étude, j'ai manipulé le 32P beaucoup moins par rapport à d'habitude	Pendant les 6 mois de l'étude, j'ai manipulé le 32P à peu près autant que d'habitude	Pendant les 6 mois de l'étude, j'ai manipulé le 32P à peu près autant que d'habitude	Pendant les 6 mois de l'étude, j'ai manipulé le 32P beaucoup plus par rapport à d'habitude
non	non	non	non	non	non	non	non	non
						En tout cas je ne m'en souviens pas au moment du questionnaire.		
oui, tout le temps	oui, tout le temps	oui, tout le temps	oui, tout le temps	oui, tout le temps	oui, tout le temps	oui, tout le temps	oui, tout le temps	oui, tout le temps
J'ai conservé les bagues dans leur petit sachet en plastique sur ma paillasse, et mon dosimètre de poitrine sur ma blouse	Dans ma blouse, en dehors de la pièce de manipulation radioc. Stockés ensemble.	dans le tiroir de ma paillasse	Dans leurs étuis dans le bureau.	Stockage sur le bureau dans un étui en plastique, les deux bagues ensemble	à l'air libre sur une étagère dans mon bureau	Sur ma paillasse, 2 dosimètres bagues stockés ensembles dans un pot en verre fermé 95% du temps. Pot ouvert 4%. Directement sur la paillasse, derrière un écran, 1%.	Les dosimètres ont été systématiquement stockés ensembles dans leur sachet plastique dans mon tiroir de bureau.	Stockés ensemble sur mon bureau dans un emballage plastique
Je les ai stocké sur ma paillasse, libre de radioactivité	?	0% (sauf lors de manipulation de 32P)	50% du temps	0	0%	Selon moi la zone était neutre.	10% du temps de l'étude. La zone neutre était une pièce spécialement destinée aux expériences liées à la radioactivité.	8. Oui, tout le temps
					Je suis désolé, même si j'étais inscrit pour cette étude, j'avais un surcroît de travail à l'université pendant la période de l'étude et donc je n'ai pas réalisé de synthèse de sonde utilisant le 32P.	Ce questionnaire arrive longtemps après la fin de l'expérience. Des remarques ont pu être oubliées.		

BIBLIOGRAPHIE

1. IRSN. Prudence : Histoire de la radioprotection [Internet]. Libcast.com. [cité 15 août 2019]. Disponible sur: <https://irsn.libcast.com/histoire-rp/prudence-histoire-de-la-radioprotection/player>
2. CNRS. Guide risques radioactifs et radioprotection v-01-2018.pdf [Internet]. [cité 21 mai 2018]. Disponible sur: <http://www.dgdr.cnrs.fr/SST/CNPS/guides/doc/radioprotection/Guide%20risques%20radioactifs%20et%20radioprotection%20v-01-2018.pdf>
3. INRS. Rayonnements ionisants. Ce qu'il faut retenir - Risques - INRS [Internet]. [cité 21 mai 2018]. Disponible sur: <http://www.inrs.fr/risques/rayonnements-ionisants/ce-qu-il-faut-retenir.html>
4. INRS. Rayonnements ionisants dossier complet.pdf [Internet]. Disponible sur: <http://www.inrs.fr/dms/inrs/GenerationPDF/accueil/risques/rayonnements-ionisants/Rayonnements%20ionisants.pdf>
5. IRSN. Les radionucléides d'origine naturelle [Internet]. [cité 8 sept 2018]. Disponible sur: <https://www.irsn.fr/FR/connaissances/Environnement/radioactivite-environnement/sources-radioactivite/Pages/2-radionucleides-origine-naturelle.aspx?dId=2ef28ef7-3363-4bed-b7b3-47a597e68d1d&dwId=02b23d3f-13d2-4faa-ab26-1e26e8c4700c#.W5PBOFkyWUI>
6. IRSN. Les sources de radioactivité naturelle [Internet]. [cité 8 sept 2018]. Disponible sur: <https://www.irsn.fr/FR/connaissances/Environnement/radioactivite-environnement/sources-radioactivite/Pages/1-sources-radioactivite-naturelle.aspx?dId=2ef28ef7-3363-4bed-b7b3-47a597e68d1d&dwId=02b23d3f-13d2-4faa-ab26-1e26e8c4700c#.W5PBYfkyWUI>
7. IRSN. L'exposition moyenne des Français et les facteurs de variation [Internet]. [cité 8 sept 2018]. Disponible sur: <https://www.irsn.fr/fr/connaissances/sante/exposition-population/exposition-population-france-metropole/pages/1-exposition-population-france-moyenne-et-variabilite.aspx#.W5PCFfkyWUI>
8. IRSN. La radioactivité naturelle renforcée [Internet]. [cité 8 sept 2018]. Disponible sur: <https://www.irsn.fr/FR/connaissances/Environnement/radioactivite-environnement/sources-radioactivite/Pages/3-radioactivite-naturelle-renforcee.aspx?dId=2ef28ef7-3363-4bed-b7b3-47a597e68d1d&dwId=02b23d3f-13d2-4faa-ab26-1e26e8c4700c#.W5PCsfkyWUI>
9. IRSN. Rapport IRSN 2015-00001 - Exposition de la population française aux rayonnements ionisants.pdf [Internet]. [cité 21 août 2019] Disponible sur : https://www.irsn.fr/FR/expertise/rapports_expertise/Documents/radioprotection/IRSN-Exposition-Population-Rayonnements-Ionisants_2015-00001.pdf
10. Radioactivite : Parcours des bêta [Internet]. [cité 15 sept 2018]. Disponible sur: http://www.laradioactivite.com/site/pages/Parcours_beta.htm
11. Radioactivite : Expositions par contact [Internet]. [cité 13 juill 2019]. Disponible sur: http://www.laradioactivite.com/site/pages/Exposition_Contact.htm
12. Radioactivite : Effets déterministes [Internet]. [cité 10 mars 2019]. Disponible sur: http://www.laradioactivite.com/site/pages/Effets_deterministes.htm
13. RG 6. Tableau - Tableaux des maladies professionnelles - INRS [Internet]. [cité 8 sept 2018]. Disponible sur: <http://www.inrs.fr/publications/bdd/mp/tableau.html?refINRS=RG%206>
14. IRSN. IRSN_guide_etude_poste_travail_V4-102015.pdf [Internet]. [cité 27 mai 2018]. Disponible sur: http://www.irsn.fr/FR/expertise/rapports_expertise/Documents/radioprotection/IRSN_guide_etude_poste_travail_V4-102015.pdf

15. République française. Code de la santé publique - Article L1333-2.
16. Union européenne. Directive 2013/59/Euratom du Conseil du 5 décembre 2013 fixant les normes de base relatives à la protection sanitaire contre les dangers résultant de l'exposition aux rayonnements ionisants et abrogeant les directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom et 2003/122/Euratom.
17. République française. Décret n° 2018-437 du 4 juin 2018 relatif à la protection des travailleurs contre les risques dus aux rayonnements ionisants. JORF n°0127 du 5 juin 2018. Texte n°65.
18. République française. Décret n° 2018-438 du 4 juin 2018 relatif à la protection contre les risques dus aux rayonnements ionisants auxquels sont soumis certains travailleurs. JORF n°0127 du 5 juin 2018. Texte n°66.
19. ASN.INSTRUCTION N° DGT/ASN/2018/229 du 2 octobre 2018 [Internet]. [cité 13 juill 2019]. Disponible sur: <https://www.asn.fr/Reglementer/Cadre-legislatif/Circulaires-directives-instructions-guides/INSTRUCTION-N-DGT-ASN-2018-229-du-2-octobre-2018>
20. République française. Arrêté du 26 juin 2019 relatif à la surveillance individuelle de l'exposition des travailleurs aux rayonnements ionisants. JORF n°0152 du 3 juillet 2019. Texte n° 18.
21. République française. Décret n°82-453 du 28 mai 1982 relatif à l'hygiène et à la sécurité du travail ainsi qu'à la prévention médicale dans la fonction publique | Legifrance [Internet]. [cité 9 sept 2018]. Disponible sur: <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=LEGITEXT000006063791>
22. République française. Loi n° 2006-686 du 13 juin 2006 relative à la transparence et à la sécurité en matière nucléaire.
23. République française. Décret n° 2016-283 du 10 mars 2016 relatif à l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire. JORF n°0060 du 11 mars 2016. Texte n°3.
24. République française. Code du travail - Article R4451-66.
25. République française. Code du travail - Article R4451-67.
26. République française. Code du travail - Article R4451-68.
27. République française. Code du travail - Article R4451-69.
28. République française. Code du travail - Article R4451-70.
29. République française. Code de la santé publique - Article L1333-8.
30. République française. Code du travail - Article R4451-112.
31. République française. Code du travail - Article R4451-14.
32. République française. Code du travail - Articles L4121-1 à L4121-5 | Legifrance [Internet]. [cité 8 sept 2018]. Disponible sur: <https://www.legifrance.gouv.fr/affichCode.do?idSectionTA=LEGISCTA000006178066&cidTexte=LEGITEXT000006072050&dateTexte=20090528>
33. République française. Code du travail - Article R4451-44.
34. République française. Code du travail - Article R4451-52.
35. République française. Code du travail - Article R4451-53.
36. République française. Code du travail - Article R4451-13.
37. République française. Code du travail - Article R4451-14.

38. République française. Code du travail - Article R4451-2.
39. République française. Code du travail - Article R4451-18.
40. République française. Code du travail - Article R4451-23.
41. République française. Code du travail - Article R4451-28.
42. République française. Code du travail - Article R4451-32.
43. République française. Code du travail - Article R4451-33.
44. République française. Code du travail - Article R4451-1.
45. République française. Code du travail - Article R4451-6.
46. République française. Arrêté du 17 juillet 2013 relatif à la carte de suivi médical et au suivi dosimétrique des travailleurs exposés aux rayonnements ionisants. JORF n°0181 du 6 août 2013. Page 13401. Texte n° 34.
47. République française. Code du travail - Article R4451-57.
48. République française. Code du travail - Article R4451-58.
49. République française. Code du travail - Article R4451-59.
50. République française. Code du travail - Article R4451-8.
51. République française. Code du travail - Article R4451-7.
52. République française. Code du travail - Article D4154-1.
53. République française. Code du travail - Article L1243-12.
54. République française. Code du travail - Article R4451-9.
55. République française. Code du travail - Article R4451-64.
56. République française. Code du travail - Article R4451-65.
57. République française. Code du travail - Article R4451-82.
58. IRSN. IRSN_Rapport-Exposition-travailleurs-2017.pdf [Internet]. [cité 23 févr 2019]. Disponible sur: https://www.irsn.fr/FR/expertise/rapports_expertise/Documents/radioprotection/IRSN_Rapport-Exposition-travailleurs-2017.pdf
59. Andraud C. La radioprotection dans le domaine de la recherche. 16 oct 2018. Marseille. Bilan national&Evénements significatifs en radioprotection (ESR) Secteur recherche [Internet]. Disponible sur: <https://www.asn.fr/Media/Files/2-Bilan-national-ASN?>
60. CELIER D. Rencontre interrégionale médecine nucléaire. 21 juin 2013. Marseille. Exposition des extrémités en médecine nucléaire [Internet]. [cité 21 août 2018]. Disponible sur: https://www.google.fr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=6&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwidwKi12r_dAhUJx4UKHaZMATcQFjAFegQIAxAC&url=https%3A%2F%2Fwww.asn.fr%2FMedia%2FFiles%2F00-Publications%2FExposition-des-extremites-en-medecine-nucleaire&usg=AOvVaw3ZAPBLQw-WiTay7MrtKxZA
61. Salesses F, Perez P, Maillard AE, Blanchard J, Mallard S, Bordenave L. Effect of dosimeter's position on occupational radiation extremity dose measurement for nuclear medicine workers during (18)F-FDG preparation for PET/CT. EJNMMI Phys. déc 2016;3(1):16.

62. Zankl M. Personal dose equivalent for photons and its variation with dosimeter position. *Health Phys.* févr 1999;76(2):162-70.
63. R. Sebihi, N. Ben Raïs, Mesure de l'exposition externe du personnel du service de médecine nucléaire de l'hôpital Ibn Sina de Rabat au cours de la manipulation des radiopharmaceutiques, *Médecine Nucléaire*. Volume 36, Issue 10, 10/2012, Pages 530-538.
64. INRS. Phosphore-32 - Brochure [Internet]. [cité 6 août 2019]. Disponible sur: <http://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%204305>
65. CNRS. Fiche2_Ecrans_de_protection.pdf [Internet]. [cité 15 sept 2018]. Disponible sur: http://www.dgdr.cnrs.fr/SST/CNPS/guides/doc/radioprotection/Fiche2_Ecrans_de_protection.pdf
66. Référence Santé au Travail. Radioprotection : Secteur recherche. Sources non scellées in vitro. [Internet]. [cité 21 août 2019]. Disponible sur: <http://www.rst-sante-travail.fr/rst/pages-article/ArticleRST.html?ref=RST.FR%209>
67. IRSN. IRSN_Fiche_dosimetre_bague.pdf [Internet]. [cité 7 juill 2019]. Disponible sur: http://dosimetrie.irsn.fr/fr-fr/Documents/Fiches%20produits/IRSN_Fiche_dosimetre_bague.pdf

Université

de Strasbourg



Faculté
de médecine

DECLARATION SUR L'HONNEUR

Document avec signature originale devant être joint :

- à votre mémoire de D.E.S.

- à votre dossier de demande de soutenance de thèse

Nom : HOSSANN

Prénom : Emil

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.

Signature originale :

A Strasbourg, le 07/08/2019

Photocopie de cette déclaration devant être annexée en dernière page de votre mémoire de D.E.S. ou de Thèse.

RESUME :

L'étude questionne l'exposition aux rayonnements ionisants de biologistes moléculaires manipulant du ^{32}P sous forme non scellée. Leur suivi dosimétrique de poitrine standardisé est négatif depuis des années. L'observation des moyens de prévention actuellement en place explique que les dosimètres de poitrine soient négatifs, mais laisse cependant supposer que l'exposition des mains est non nulle. L'évaluation métrologique de cette exposition n'était pas réalisée jusqu'alors. Sur cette population et en conditions de travail habituelles, l'hypothèse était que la dosimétrie de poitrine sous-estimait l'exposition réelle, celle-ci étant probablement concentrée aux extrémités à des niveaux détectables. Les objectifs étaient de démontrer la meilleure représentativité de la dosimétrie d'extrémité, d'évaluer l'exposition réelle des mains des opérateurs (pour ensuite adapter leur information, catégorisation, suivi médical et dosimétrique et la confronter aux modèles de calcul de dose prédictifs) et de proposer un retour d'expérience afin de diffuser nos recommandations d'évolution des pratiques.

Dans le cadre d'une collaboration pluridisciplinaire, des recherches bibliographiques et études de postes ont été réalisées. Les agents inclus dans l'étude devaient n'utiliser que du ^{32}P . Ils ont porté pendant 6 mois un dosimètre bague à chaque main en plus de leur dosimètre de poitrine trimestriel habituel. En parallèle ils devaient remplir un tableau de suivi de leur activité. Un questionnaire a évalué l'observance des consignes a posteriori.

La recherche bibliographique a mis en évidence peu d'articles sur l'évaluation de l'exposition au ^{32}P en laboratoire de biologie moléculaire. Les études de postes ont confirmé que les mains des agents étaient exposées à plusieurs reprises durant les manipulations. 17 agents susceptibles d'utiliser du ^{32}P , issus de deux laboratoires de recherche, ont participé à l'étude. Deux agents n'ont pas manipulé de ^{32}P durant l'étude (aucun ne présentait de dosimètre positif). Sur les 15 agents ayant manipulé, 8 présentaient une dosimétrie bague positive, versus 0 en dosimétrie de poitrine, cette différence étant significative ($p \approx 0.001$). L'exposition moyenne aux extrémités était de 0.07-0.14mSv pour un maximum de 0.55mSv. Les mains non dominantes (non pipetantes) étaient statistiquement 3 fois plus exposées que les autres (environ +0.1mSv). L'observance déclarée était très bonne. Les valeurs mesurées étaient entre 3 et 63 fois inférieures aux valeurs prédictives ayant été calculées sur la base des tableaux de suivi par la personne compétente en radioprotection.

L'hypothèse a été confirmée. Nous avons pu démontrer que, malgré la négativité des dosimètres de poitrine, il existe une exposition des mains, certes moindre que les valeurs prédictives calculées, et bien inférieure aux doses limites d'exposition réglementaire du public. Cette exposition est insignifiante, le risque radiologique étant ici superposable à celui de la population générale. Malgré l'estimation puis l'application de larges marges de sécurité à ces valeurs, nous avons conclu que la classification « travailleur exposé » et de fait le suivi dosimétrique de notre population n'était pas nécessaire. Le dialogue avec les agents a permis une réassurance. Des propositions d'optimisation des pratiques ont pu être faites pour les deux laboratoires ayant participé à l'étude et diffusées plus largement.

Les résultats de cette étude amènent à se poser la question de la transposition de ces résultats à d'autres laboratoires de recherche. Celle-ci est probablement possible sous réserve de réalisation d'études de postes et d'une collaboration entre les différents acteurs de la prévention des risques professionnels dans ces structures.

Rubrique de classement : Médecine du Travail

Mots-clés : Radioprotection, Personnel de laboratoire, Biologie Moléculaire, Radio-isotopes du Phosphore, Particule bêta, Exposition professionnelle, Dosimètre, Radioactivité, Rayonnement ionisant, Dosimétrie par thermoluminescence.

Président : Professeur Maria GONZALEZ

Assesseurs : Docteur Simone MUNCH

Docteur Nathalie NOURRY

Docteur Fabrice HUBELE

Adresse de l'auteur : 9 place de l'hôpital, 67000 Strasbourg, France